



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Desenvolvimento de um sistema de sensorização e controlo do embaciamento de superfícies envidraçadas em sistemas de refrigeração

Marcelo André Camilo Batista

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletromecânica
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Pedro Dinis Gaspar
Co-orientador: Prof. Doutor Pedro Dinho da Silva

Covilhã, outubro de 2014

Dedicatória

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, sacrifício e paciência demonstrados. A eles dedico este trabalho.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.”

Nikola Tesla

Agradecimentos

O espaço limitado desta secção de agradecimentos, seguramente, não me permite agradecer como devia a todas as pessoas, que ao longo do meu Mestrado em Engenharia Eletromecânica na UBI, me ajudaram, direta ou indiretamente, a cumprir os meus objetivos e a realizar mais esta etapa da minha formação académica. Desta forma, deixo apenas algumas palavras, poucas, mas com um sentido e profundo sentimento de reconhecido agradecimento.

Ao Professor Doutor Pedro Dinis Gaspar, pela sua orientação, total apoio, disponibilidade, pelo saber que transmitiu, pelas opiniões e críticas, pela total colaboração no solucionar de dúvidas e problemas que foram surgindo ao longo da realização deste trabalho e por todas as palavras de incentivo.

Ao Professor Doutor Pedro Dinho da Silva, pela sua orientação, pela ajuda demonstrada, pela total disponibilidade na colaboração dos ensaios experimentais e pelas opiniões e sugestões que foram surgindo ao longo deste trabalho.

Ao meu antigo professor Luís Silva da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Portalegre, pelo profissionalismo, pela disponibilidade e ajuda que sempre revelou para comigo. O seu apoio foi determinante na elaboração desta Tese.

Ao técnico de Laboratório José Paulo Proença Guerra, do Departamento de Eletromecânica da UBI, por toda a disponibilidade e ajuda fornecida.

Ao Sr. Florindo Silva, por todas as sugestões, simpatia demonstrada, pelo material fornecido e por toda a ajuda disponibilizada na construção do expositor.

Aos meus amigos, os verdadeiros e sempre presentes, por acreditarem em mim e me apoiarem em todos os momentos.

À minha namorada e amiga Sílvia Silva, pelo apoio e carinho diários, pela paciência demonstrada e pela transmissão de confiança e de força, em todos os momentos. Por tudo, a minha enorme gratidão.

Por fim, mas não em último, agradeço à minha família, em especial aos meus Pais e ao Meu Irmão, um enorme obrigado por acreditarem sempre em mim e naquilo que faço e por todos os ensinamentos de vida. Espero que esta etapa que agora termino, possa de alguma forma, retribuir e compensar todo o carinho, apoio e dedicação, que constantemente me oferecem. A eles dedico todo este trabalho.

Resumo

O crescente aumento de consumo energético em lojas de comércio alimentar, levou à necessidade de procurar novas metodologias e soluções de modo a racionalizar energia. O consumo energético neste tipo de edifícios é elevado, pertencendo metade da fatia do bolo energético à refrigeração. Devido à necessidade de manter os produtos comercializados nas melhores condições de conservação, as lojas de comércio alimentar são obrigadas a operar os seus equipamentos de refrigeração continuamente, resultando num consumo contínuo de energia. Grande parte deste consumo advém dos expositores de refrigeração/congelamento. Este tipo de equipamentos está a ganhar cada vez mais popularidade devido à sua principal funcionalidade, manter o produto conservado em frio e simultaneamente exibi-lo para o consumidor. Contudo, devido aos problemas de funcionamento e elevados consumos apresentados pelos expositores abertos, estes têm vindo a ser substituídos pelos expositores fechados.

Os expositores fechados apresentam um consumo energético menor que os expositores abertos. No entanto, a colocação de uma porta vidrada num expositor acarreta outro problema, o embaciamento da mesma. Para contornar este problema, são aplicados sistemas anti-embaciamento na superfície vidrada deste tipo de expositores. Mas este tipo de sistema é normalmente aplicado sem controlo algum, o que leva a que o mesmo apresente um funcionamento contínuo e posteriormente seja responsável por grande parte da energia consumida por este tipo de expositores. É no contexto de evitar este consumo contínuo por parte destes sistemas que surge o desenvolvimento deste trabalho.

O presente estudo aborda o desenvolvimento e construção de um sensor de humidade de baixo custo e respetivo circuito de controlo para o embaciamento de superfícies vidradas, com a finalidade de evitar o contínuo consumo energético por parte deste sistema. O trabalho em questão inclui ainda o estudo experimental realizado numa bancada de ensaios, com a finalidade de verificar o correto funcionamento dos dispositivos desenvolvidos. O estudo efetuado têm como principal propósito verificar a funcionalidade do sistema anti-embaciamento com um sensor de humidade e respetivo circuito de controlo de baixo custo. Concluiu-se que os equipamentos desenvolvidos permitem monitorizar corretamente o embaciamento, e simultaneamente evitar o contínuo consumo energético.

Palavras-chave

Sistema anti-embaciamento, Sensor de humidade, Circuito de controlo, Expositor de Refrigeração/Congelamento, Humidade Relativa, Eficiência Energética.

Abstract

The energy consumption increase in the food retail sector, promote seeking new solutions and methodologies to rationalize energy. In this type of buildings, the energy consumption is high, belonging half slice of energy consumption to food products refrigeration. Due to the need of keeping the food products marketed under the best storage conditions, food retail stores are required to operate their cooling equipment continuously, resulting in a continuous power consumption. Much of this consumption comes from chilling/freezer display cases. This type of equipment gained popularity due to its main feature, keeping the cold product stored and simultaneously displayed it to the consumer. However, due to the operation problems and high-energy consumption presented by the open display cases, they are been replaced by closed display cases.

The closed display cases feature a lower energy consumption than open ones. However, the placement of a glazed door in a display case causes another problem, the fogging of the glass surface. To overcome this problem, anti-sweat heaters are used in this type of display case. But this kind of system is usually applied without any control, which leads to a continuous operation and subsequently responsible for much of the energy consumed by this type of display case. The present work involves the development of a fogging monitoring system that avoids the continuous consumption by these systems.

The present study deals with the development and construction of a low cost humidity sensor and respective control circuit of fogging formation in glass surfaces, in order to avoid the continuous power consumption by this system. The present work also includes the experimental study conducted in a bench trial, in order to verify the correct functioning of the developed devices. The studies performed have the main purpose to verify the functionality of the anti-sweat heater with a low cost humidity sensor and respective control circuit. It was concluded that the developed equipment allows proper monitoring and control of fogging formation in the glass surface of closed display cases, avoiding its continuous energy consumption.

Keywords

Anti-Sweat Heater, Humidity Sensor, Control Circuit, Display Refrigerators, Relative Humidity, Energy Efficiency.

Índice

Dedicatória	ii
Agradecimentos	iii
Resumo	iv
Índice	vi
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tabelas	xi
Nomenclatura.....	xii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	2
1.2. O problema em estudo e a sua relevância	3
1.3. Objetivos e contribuição da dissertação	3
1.4. Visão geral e organização da dissertação	4
2. Estado da arte	5
2.1. Introdução	5
2.2. Lojas de comércio alimentar	5
2.2.1. Tipos de expositores.....	7
2.3. Expositores refrigerados.....	8
2.3.1. Temperaturas dos produtos	9
2.3.2. Condições exteriores	10
2.3.3. Dispositivos de anti-embaciamento em superfícies envidraçadas.....	13
2.3.4. Carga de refrigeração de um expositor refrigerado.....	16
2.4. Estudos experimentais e numéricos	23
2.5. Nota conclusiva	30
3. Monitorização do Embaciamento.....	31
3.1. Introdução	31
3.2. Sensores de humidade	31
3.2.1. Sensores de humidade capacitivos.....	32
3.2.2. Sensores de humidade resistivos	33
3.3. Sensor de humidade desenvolvido	34
3.3.1. Dimensionamento do circuito.....	34
3.3.2. Montagem e validação do sensor	40
3.3.3. Análise e discussão de resultados	46
3.4. Nota conclusiva	50

4. Protótipo experimental.....	51
4.1. Introdução	51
4.2. Expositor desenvolvido	51
4.2.1. Dimensionamento	51
4.2.2. Construção do expositor	53
4.3. Circuito de controlo	54
4.3.1. Desenvolvimento do circuito de controlo	55
4.3.2. Simulação em <i>Multisim</i>	66
4.4. Placa de circuito impresso	70
4.4.1. Desenvolvimento do PCB.....	71
4.5. Nota conclusiva	74
5. Estudo experimental	75
5.1. Introdução	75
5.2. Unidade experimental	75
5.2.1. Caracterização da unidade	75
5.3. Ensaio experimental	79
5.3.1. Procedimento experimental	79
5.4. Análise e discussão de resultados.....	80
6. Conclusões.....	83
6.1. Considerações gerais	83
6.2. Conclusões específicas.....	83
6.3. Sugestões de trabalhos futuros.....	85
Referências bibliográficas	86
Anexo A - Datasheets dos componentes eletrónicos.....	90
Anexo B - Desenho técnico expositor	98

Lista de Figuras

Figura 1 - Projeção do consumo energético mundial até 2040 (U.S. Energy Information Administration, 2013)	1
Figura 2 - Distribuição das lojas de comércio alimentar nos EUA em 2004 (ASHRAE, 2010).	6
Figura 3 - Percentagem de energia elétrica consumida por setor, em lojas de comércio alimentar nos EUA (ASHRAE, 2010).	6
Figura 4 - Tipos de expositores refrigerados (Walker et al., 2004).	7
Figura 5 - Distribuição por tipo de expositores refrigerados num típico supermercado (ASHRAE, 2010).	9
Figura 6 - Condensado recolhido em função da humidade relativa por tipo de expositores refrigerados (ASHRAE, 2010).	12
Figura 7 - Percentagem de calor latente na carga total de refrigeração em função da humidade relativa por tipo de expositor refrigerado (ASHRAE, 2010).	13
Figura 8 - Diagrama psicrométrico simplificado (Pinheiro, 2011).	14
Figura 9 - Localização típica dos dispositivos anti embaciamento (Faramarzi, 2008).	15
Figura 10 - Comparação das cargas térmicas de um expositor refrigerado aberto e fechado (Evans, 2014).	17
Figura 11 - Consumo energético dos dispositivos anti embaciamento em função da humidade nos 3 cenários (Faramarzi et al., 2001).	23
Figura 12 - Consumo de energia elétrica por componente nos expositores refrigerados abertos e fechados, durante o periodo de teste (51 dias) (Fricke & Becker, 2010).	25
Figura 13 - Previsão numérica da evolução da camada de condensado durante a atuação dos dispositivos de anti-embaciamento (D'Agaro et al., 2006).	27
Figura 14 - Desenho do sistema criado para os expositores refrigerados fechados (Coonrod 2010).	27
Figura 15 - Figura esquemática de um expositor refrigerado fechado com a incorporação do sistema de desembaciamento criado (Taras et al., 2010).	28
Figura 16 - Fluxograma ilustrativo da aplicação do sensor de humidade em ligação com um expositor refrigerador e respetivos modos de funcionamento (Veerasamy & Rogueiro., 2014)	29
Figura 17 - Vista frontal ampliada do expositor refrigerado, incluindo um sensor do sistema de controlo acoplado ao batente da porta (Sunderland et al., 2011).	30
Figura 18 - Sensor de humidade capacitivo (Castro, 2011).	32
Figura 19 - Estrutura capacitiva seleccionada (adaptado de: Kaur, 2014).	34
Figura 20 - Dimensões das placas de cobre do sensor de humidade desenvolvido.	35
Figura 21 - Esquema do transistor utilizado e respetivo simbolo em circuitos (Motorola, 1996) ..	36
Figura 22 - Interface do software Multisim.	37

Figura 23 - Circuito utilizado para a medição da humidade relativa do ar.....	38
Figura 24 - Circuito utilizado na simulação no software Multisim.	39
Figura 25 - Circuito utilizado na simulação no software Multisim para o caso extremo de 0% de HR.....	40
Figura 26 - Fotografias do sensor de humidade de baixo custo desenvolvido.....	40
Figura 27 - Esquema de montagem do circuito do sensor	41
Figura 28 - Data logger NT3.	42
Figura 29 - Sensor de temperatura/humidade hygroclip S.	42
Figura 30 - Cole Parmer Digi Sense R/S.....	43
Figura 31 - Esquema de funcionamento do AC utilizado durante a calibração do sensor.....	44
Figura 32 - P.A Hilton AR condicionado Unit A573.	45
Figura 33 - Circuito do sensor durante a calibração. A- Orifício onde foi colocado o sensor de humidade desenvolvido. B- Orifício onde foi colocado o sensor de referência.	45
Figura 34 - Curva de calibração obtida com os respetivos limites do intervalo de confiança a 95%.....	47
Figura 35 - Curva de operação do sensor de humidade relativa do ar desenvolvido.	48
Figura 36 - Curva de operação do sensor de humidade relativa do ar para valores inferiores a 47% HR.	49
Figura 37 - Desenho do modelo do expositor, efetuado em software SolidWorks.	53
Figura 38 - Fotografia do expositor construído.	54
Figura 39 - Transferência entre dois fluidos separados por uma superfície.....	56
Figura 40 - Circuito comparador usando um AMPOP (ISCTE, 2014).	61
Figura 41 - A-princípio de funcionamento de um relé. B- Relé EDR201A12 utilizado.	62
Figura 42 - Esquema de um diodo (Electrónica, 2014).	62
Figura 43 - Esquema do circuito de controlo.	63
Figura 44 - Divisor de tensão com resistências.	64
Figura 45 - Leitura do osciloscópio no ensaio a 75% HR.....	67
Figura 46 - Leitura do osciloscópio no ensaio a 37,25% HR.	68
Figura 47 - Leitura do osciloscópio no ensaio a 36,75% HR.	69
Figura 48 - Leitura do osciloscópio no ensaio a 36,50% HR.	70
Figura 49 - Circuito de controlo modificado para aplicação em PCB.	72
Figura 50 - Layout do PCB com os respetivos componentes do circuito e ligações.	73
Figura 51 - Visualização em 3D do PCB dimensionado.	74
Figura 52 - Aplicação do fio de cobre em torno da superfície vidrada e aplicação do isolamento entre vidro e acrílico.	77
Figura 53 - Fotografias do expositor acoplado ao AC P.A.Hilton.	77
Figura 54 - Esquema de montagem do circuito de controlo.....	78

Figura 55 - Montagem experimental. A- AC acoplado ao expositor e circuito de controlo. B- Fonte de tensão de 24V e Sensor de temperatura/humidade de referência. 78

Figura 56 - Fotografia do circuito de controlo e respetivos valores mensurados pelos sensores de humidade para o ensaio a 35% de humidade relativa. 80

Figura 57 - Fotografia do circuito de controlo e respetivos valores mensurados pelos sensores de humidade para o ensaio a 39% de humidade relativa. 81

Figura 58 - Fotografia do circuito de controlo e respetivos valores mensurados pelos sensores de humidade para o ensaio a 79% de humidade relativa. 81

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Temperatura do ar descarregado nos expositores refrigerados (Baptista et al., 2007).	10
Tabela 2 - Condições ambiente nas lojas de comércio alimentar nos EUA (ASHRAE, 2010).	11
Tabela 3 - Capacidade elétrica do condensador para as duas situações extremas (100% e 0% de HR).	35
Tabela 4 - Componentes eletrônicos utilizados no circuito.....	36
Tabela 5 - Material utilizado na calibração do sensor.	41
Tabela 6 - Valores médios obtidos durante a calibração do sensor.....	46
Tabela 7 - Tabela de fios e cabos padrão para fios de cromo-níquel (EDUFER, 2014).	59
Tabela 8 - Componentes eletrônicos utilizados no circuito de controlo.	61
Tabela 9 - Material utilizado para a realização do estudo experimental.	76

Nomenclatura

Geral:

A	Área, [m ²];
C	Capacidade elétrica [F];
C_p	Calor específico [J·Kg ⁻¹ ·C ⁻¹];
d	Distância [m];
db	Bolbo seco;
e	Carga elétrica, [C];
h	Coefficiente de transferência térmica, [W·m ⁻² ·K ⁻¹];
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água, [J·kg ⁻¹];
HR	Humidade relativa, [%];
I	Corrente elétrica, [A];
K	Coefficiente de transmissão de calor por condução, [W·m ⁻² ·K ⁻¹];
k_1	Fração de calor dissipado, [%];
L	Comprimento característico, [m];
m	Massa, [kg];
N	Quantidade de produtos;
n	Numero de portadores de carga;
p	Pressão, [Pa];
P, W	Potência, [W];
Q	Carga térmica, [W];
R	Resistência elétrica, [Ω];
t	Tempo, [s];
T	Temperatura, [K ou °C];
U	Coefficiente global de transferência de calor, [W·m ⁻² ·°C ⁻¹];
US\$	Dólares Americanos [\$];
V	Tensão elétrica, [V];

Índices inferiores:

O	Vácuo;
ar	Ar;
$água$	Água;
C	Condução;

<i>c</i>	Superfícies do interior;
<i>case</i>	Ar interior;
<i>c-w</i>	Fator de forma;
<i>ext</i>	Exterior;
<i>expositor</i>	Expositor;
<i>f</i>	Conservação do produto;
<i>fans</i>	Ventiladores;
<i>i</i>	Final;
<i>il</i>	Calor latente por infiltração;
<i>int</i>	Interior;
<i>is</i>	Calor sensível por infiltração;
<i>l</i>	Iluminação;
<i>latente</i>	Latente;
<i>orvalho</i>	Ponto de orvalho;
<i>pd</i>	Descongelamento;
<i>pr</i>	Respiração do produto;
<i>ps</i>	Temperatura inicial do produto;
<i>r</i>	Radiação;
	Relativa;
<i>room</i>	Ar exterior;
<i>s</i>	Inicial;
<i>sat</i>	Saturação;
<i>sense inf</i>	Sensível por infiltração;
<i>sensível</i>	Sensível;
<i>sup</i>	Superfície;
<i>v</i>	Vapor de água;
<i>w</i>	Paredes da loja;

Simbologia grega:

σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$].
ϕ	Humidade relativa, [%];
ρ	Massa específica, [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];
	Resistividade elétrica, [$\Omega \cdot \text{m}^{-1}$];
Δ	Variação;

κ	Condutividade térmica, [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$];
μ	Mobilidade, [$\text{m}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$];
ε	Emissividade;
ω	Humidade absoluta [$\text{g}_{\text{água}}\cdot\text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$];

Acrónimos:

<i>AWG</i>	American Wire Gauge;
<i>ASH</i>	Anti Sweat Heater;
<i>ASHRAE</i>	American society of heating, refrigerating and air-conditioning;
<i>AC</i>	Ar Condicionado;
<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics;
<i>FDA</i>	Food and Drug Administration;
<i>FMI</i>	Food Market Institute;
<i>ISO</i>	International organization for standardization;
<i>LED</i>	Light-emitting-diode;
<i>MATLAB</i>	Matrix Laboratory;
<i>PCB</i>	Print Circuit Board;
<i>SOIC</i>	Small Outline Integrated Circuit.

1. Introdução

A sociedade atual atravessa uma época em que a energia apresenta um papel essencial no desenvolvimento das nações, constituindo o motor que alimenta o seu progresso. Em contrapartida, a crescente procura e consumo de energia, nas suas diversas formas, levou a uma progressiva destruição do meio ambiente e degradação da qualidade de vida de todos os seres vivos, devido à enorme utilização de combustíveis fósseis na produção da mesma, como é possível verificar através da Figura 1.

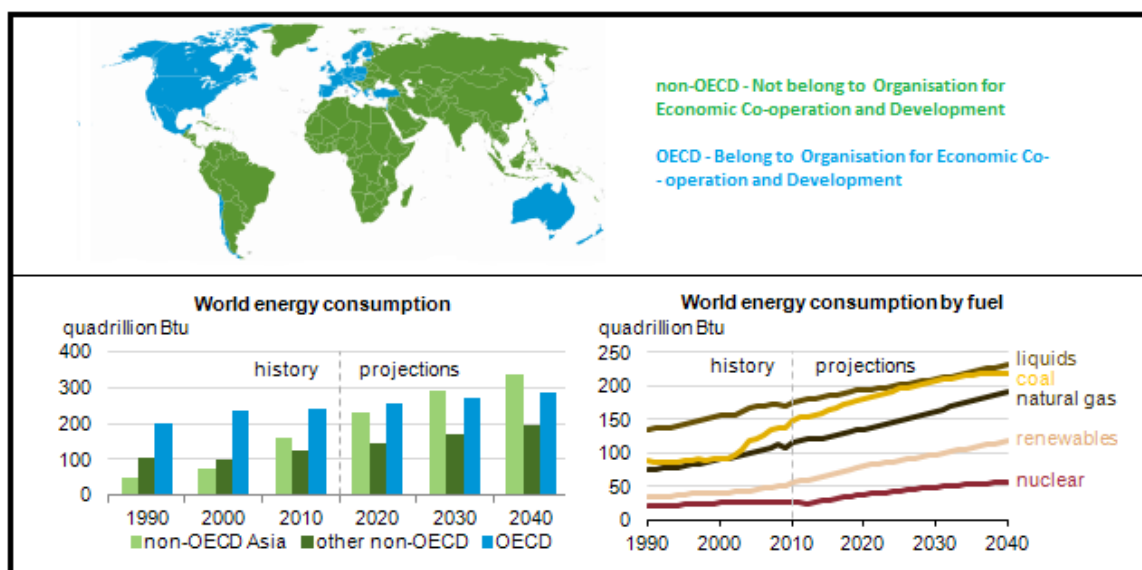


Figura 1 - Projeção do consumo energético mundial até 2040 (U.S. Energy Information Administration, 2013)

A previsão da Figura 1 mostra que o consumo energético vai continuar a aumentar ao longo das próximas décadas. Esta situação deve-se em grande parte, ao desenvolvimento de novas potências, tal como a Índia, Brasil ou China, que necessitam cada vez mais de energia. No entanto, apesar da elevada utilização de combustíveis fósseis acarretar graves consequência para o meio ambiente, tal como a contaminação do ar pela sua combustão, este tipo de combustíveis vão continuar a ser os mais utilizados em detrimento das energias renováveis.

Uma possível solução para a redução do consumo energético, passa pela eficiência da utilização de energia. As ações que visam a minimização do consumo energético, geralmente não são simples e requerem estudos e análises. Em muitos casos, as ações provenientes destes estudos voltados para os equipamentos que utilizam energia elétrica acabam por não ser atrativas economicamente e não reduzem significativamente os gastos. Estas condições, por vezes acabam por injustificar a implementação de novas

tecnologias ou programas que visam a eficiência energética, devido ao elevado tempo de retorno do investimento inicial.

Em instalações industriais que utilizem sistemas de refrigeração associados ao sector alimentar, a otimização do consumo de energia associado a um elevado padrão de qualidade é um dos principais objetivos da engenharia moderna. Um dos setores mais importantes da indústria de distribuição são os grandes supermercados. Neste setor, os custos associados aos sistemas de refrigeração (câmaras de frio, antecâmaras e expositores refrigerados) atingem valores em torno de 50% do total dos custos do consumo de energia. Este cenário faz com que todas as estratégias direcionadas para uma redução do consumo de energia na refrigeração sejam consideradas (Garcia, & Coelho., 2010).

A presente dissertação centra-se no desenvolvimento de um sensor de humidade e respetivo circuito de controlo, de baixo custo, que permita monitorizar a humidade relativa no interior de um expositor fechado com porta vidrada, de modo a controlar o funcionamento dos sistemas de anti-embaciamento do mesmo. Devido ao facto deste tipo de sistemas apresentar um consumo contínuo, é necessário e oportuno estudar soluções economicamente viáveis de modo a que seja possível reduzir o consumo energético destes expositores.

1.1. Enquadramento

O crescente aumento da população urbana e as necessidades da vida moderna são dois fatores chave para o desenvolvimento do setor da refrigeração comercial. A utilização dos equipamentos neste setor tem vindo a crescer cada vez mais. De acordo com o estudo efetuado pela Transparency Market Research (2012), o mercado global dos equipamentos de refrigeração comercial vai sofrer um crescimento em torno de 60% até ao ano de 2018. O aumento das atividades comerciais que envolvem produtos alimentares que necessitam de refrigeração, é a principal causa deste crescimento, no entanto, os hábitos das pessoas apresentam também uma enorme influência neste setor. As cidades apresentam um contínuo crescimento populacional e devido às necessidades sociais e profissionais, as pessoas têm cada vez menos tempo para se dedicar à preparação de refeições. Esta situação leva a que grande parte dos habitantes procure alimentos refrigerados/congelados prontos ou parcialmente preparados. (Misicka & Stephens., 2013).

O objetivo dos expositores refrigerados é apresentar o produto de forma atraente e em ótimas condições de qualidade, incentivando os clientes a comprar e proporcionando uma fácil interação entre o equipamento e o consumidor. Regra geral, as características de *design* e o *layout* dos equipamentos são baseados em especificações de marketing, de modo a aumentar a venda de produtos. Estas características fazem deste tipo de expositores, uma crescente aposta das entidades comerciais (Evans, 2014).

Contudo, para que os alimentos sejam mantidos em perfeitas condições, é necessário que as entidades comerciais operem os seus equipamentos de refrigeração continuamente. Esta operação leva inevitavelmente, a um maior consumo de energia. Assim, é essencial aumentar a eficiência energética dos equipamentos de refrigeração, de modo a que os comerciantes possam obter uma fatura energética menor.

1.2. O problema em estudo e a sua relevância

A colocação de portas envidraçadas em expositores refrigerados acarreta a vantagem de continuar a possibilitar a visualização dos produtos do interior do expositor, apresentando este tipo de equipamento um consumo inferior aos expositores refrigerados abertos. No entanto a manutenção desta visibilidade através das portas envidraçadas dos expositores refrigerados fechados apresenta algumas dificuldades. A diferença das condições ambiente, nomeadamente temperatura e humidade do ar, entre o interior e o exterior do expositor refrigerado, tende a causar embaciamento na superfície vidrada. Esta condensação, causa problemas na visualização do produto por parte do consumidor, levando a que as vendas dos mesmos sofram reduções (Rauss *et al.*, 2008).

Para controlar este fenómeno, são geralmente usados “aquecedores” de baixa temperatura. Estes são resistências elétricas, R , localizadas em torno da moldura da porta de vidro, que através da passagem de corrente elétrica, I , pelas mesmas, produzem calor (por Efeito de Joule) ($P=R I^2$) com o intuito de evitar a condensação na superfície vidrada e nas superfícies metálicas da porta. No entanto, estas resistências normalmente operam continuamente (8760h por ano), levando a um consumo contínuo de energia elétrica (Faramarzi, 1999).

1.3. Objetivos e contribuição da dissertação

O objetivo da presente dissertação consiste no desenvolvimento de um sensor de humidade e respetivo circuito de controlo para aplicação a sistemas anti-embaciamento. Pretende-se com o desenvolvimento do sensor e do circuito de controlo, controlar a funcionalidade de sistemas anti-embaciamento de um expositor refrigerado/congelamento fechado, com o grande objetivo de evitar o consumo contínuo de energia por parte deste sistema.

Atualmente existem equipamentos associados aos sistemas de anti-embaciamento que evitam o seu funcionamento contínuo. Contudo, os equipamentos existentes são mais complexos e inevitavelmente mais caros, o que leva a um aumento do tempo de amortização do custo do investimento inicial. É a partir destas considerações que surge a necessidade de desenvolver um controlador simples e de baixo custo que cumpra com os requisitos do processo, de modo a diminuir o tempo de amortização do custo inicial por

parte do proprietário, e que permita manter o controlo nos sistemas de anti-embaciamento dos expositores refrigerados fechados evitando um continuo consumo energético por parte destes sistemas.

1.4. Visão geral e organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos, que descrevem o desenrolar do trabalho efetuado desde o enquadramento teórico até ao estudo experimental e respetivos resultados.

O capítulo 1 contém a parte introdutória da dissertação, onde é exibido o enquadramento do trabalho a realizar bem como os objetivos propostos.

No capítulo 2 é efetuada uma revisão bibliográfica dos temas teóricos abrangidos pela presente dissertação. Neste capítulo é ainda efetuada uma breve análise aos principais trabalhos e estudos realizados nesta área e por fim são apresentados alguns protótipos desenvolvidos.

O capítulo 3 contém uma breve passagem pela fundamentação teórica sobre sensores de humidade e posteriormente é apresentado o sensor de humidade desenvolvido. Neste capítulo são exibidas todas as etapas do desenvolvimento do sensor de humidade bem como os resultados obtidos experimentalmente da sua calibração.

O capítulo 4 é todo ele dedicado para a apresentação do protótipo experimental desenvolvido. No final do capítulo em questão, é ainda exibido o PCB obtido do circuito de controlo dimensionado.

O capítulo 5 contém a apresentação da unidade experimental final bem como exhibe os ensaios efetuados e resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 6 realiza-se a conclusão do estudo efetuado com base nos protótipos contruídos e resultados alcançados. São ainda apresentadas sugestões de trabalhos futuros na área em questão.

2. Estado da arte

2.1. Introdução

No presente capítulo é efetuada uma abordagem teórica aos temas englobados na dissertação, com o intuito de contextualizar o leitor para os diferentes conceitos e áreas que abrangem a mesma. Posteriormente são apresentados os estudos e trabalhos mais relevantes da área efetuados.

Como os expositores refrigerados/congelados fechados somente ganharam mais ênfase nos últimos anos, a maioria dos estudos efetuados até então, centra-se nos expositores refrigerados abertos, pelo que a bibliografia disponível sobre os expositores fechados é limitada.

2.2. Lojas de comércio alimentar

O pequeno comércio alimentar foi em tempos responsável pelo abastecimento de toda a população. O mercado de venda a retalho era caracterizado pelo número elevado de pequenos estabelecimentos e a rede de distribuição alimentar era caracterizada pela existência de um número elevado de distribuidores de pequena dimensão. No entanto, esta distribuição começou a sofrer algumas alterações devido ao aumento e alteração de comportamentos da população. O consumidor passou a procurar lojas de grandes dimensões em detrimento de espaços comerciais mais pequenos, nas quais passou a poder usufruir de uma elevada variedade de produtos (alimentares e não alimentares), num só espaço, com preços mais competitivos (Baptista *et al.*, 2007)

As lojas de comércio alimentar continuam a expandir-se devido ao aumento da população e da conseqüente procura de alimentos. Nos Estados Unidos, existem cerca de 200 mil lojas de comercialização de alimentos, que operam continuamente os seus sistemas de refrigeração, de modo a garantir a segurança e comercialização adequada dos seus produtos alimentares. A Figura 2 mostra que, das 200 mil lojas de comercialização de alimentos existentes nos Estados Unidos, 76% são lojas de conveniência e 17% são supermercados (ASHRAE, 2010).

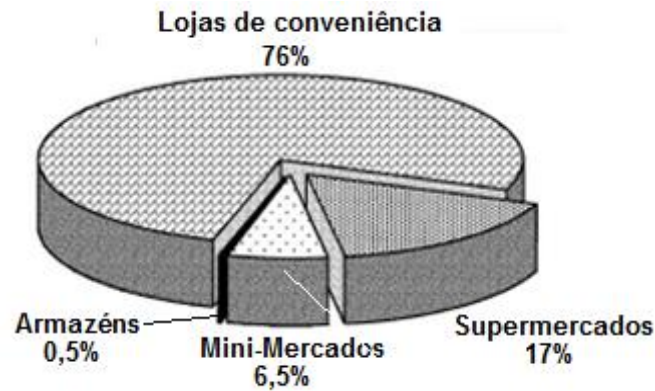


Figura 2 - Distribuição das lojas de comércio alimentar nos EUA em 2004 (ASHRAE, 2010).

O consumo de energia em lojas de comercialização alimentar depende de muitos fatores, tal como o formato da loja, o mix de produtos comercializado, a atividade comercial, as práticas de negócio, bem como os equipamentos utilizados, etc. Porém, como é exibido na Figura 3, a refrigeração é responsável por aproximadamente 50% do consumo de energia elétrica de um típico supermercado.

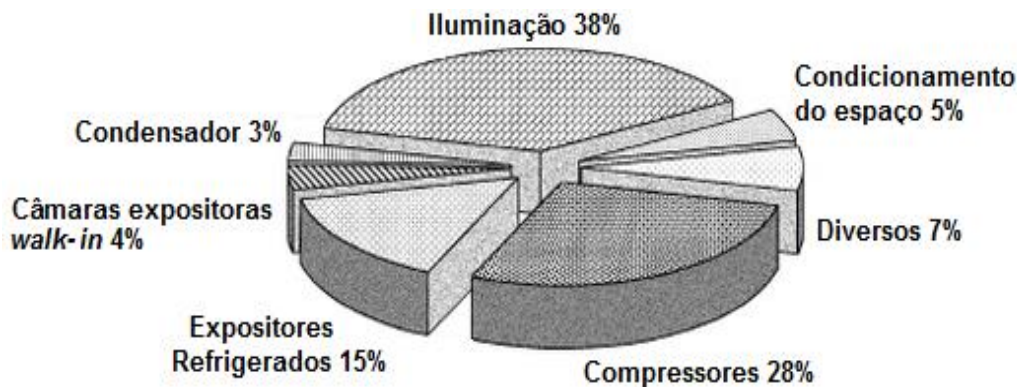


Figura 3 - Percentagem de energia elétrica consumida por setor, em lojas de comércio alimentar nos EUA (ASHRAE, 2010).

Os supermercados e as mercearias apresentam uma das mais altas intensidades de uso de energia elétrica dentro dos edifícios do sector comercial, cerca de 1650 MJ/m² anuais. Por sua vez, os supermercados de dimensões mais elevadas e com longas horas de funcionamento, apresentam um consumo de 2710 MJ/m² anual (ASHRAE, 2010).

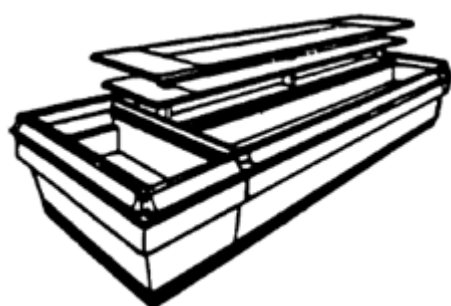
A *Food Marketing Institute* (2004) define supermercado como uma qualquer linha de self-service, de mercearia completa, com um volume de vendas anual de pelo menos 2 milhões de dólares. Estas lojas ocupam geralmente uma área de 4650 m² e oferecem uma variedade de carnes, peixe e outros alimentos. A mais recente categoria de

supermercados, são os denominados hipermercados. Estes combinam as características de um supermercado com outras lojas de departamento num só edifício.

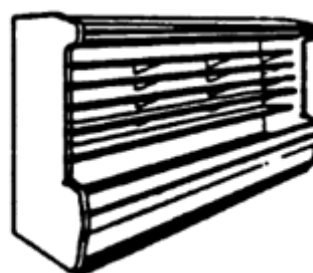
Quase metade das vendas das lojas de comercialização alimentar são de alimentos perecíveis, incluindo carnes frescas, produtos lácteos, alimentos congelados, gelados, refeições preparadas, etc. Estes produtos alimentares devem ser mantidos a temperaturas seguras durante o transporte, armazenamento e processamento, bem como durante a exibição na loja. Os equipamentos de refrigeração utilizados nas lojas de comércio alimentar, podem ser agrupados em expositores refrigerados, câmaras de refrigeração e antecâmaras (ASHRAE, 2010).

2.2.1. Tipos de expositores

O objetivo dos expositores refrigerados de um supermercado é fornecer armazenamento temporário para os alimentos perecíveis antes da venda. Grande parte das características de *design* e layout dos expositores são baseadas em restrições e especificações de marketing. A configuração destes expositores passa pelas quatro categorias diferentes apresentadas na Figura 4 (Walker *et al.*, 2004).



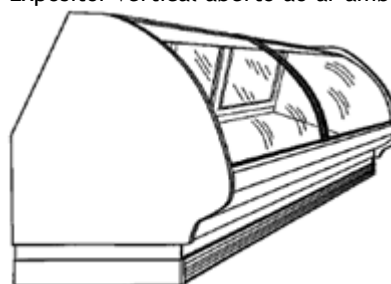
(a) Ilha.



(b) Expositor vertical aberto ao ar ambiente.



(c) Expositor vertical fechado.



(d) Vitrina.

Figura 4 - Tipos de expositores refrigerados (Walker *et al.*, 2004).

- **Ilha:** O expositor do tipo ilha é geralmente usado para o armazenamento e exposição de alimentos congelados. Estes operam a uma temperatura quase uniforme e de todos os expositores, são os que exigem menor quantidade de

refrigeração por m². No entanto, a sua principal desvantagem está relacionada com o baixo volume de armazenamento do produto;

- **Expositor aberto com prateleiras:** Este tipo de expositor possui o maior volume de armazenamento por m², devido à utilização vertical do equipamento e da organização por prateleiras. Este tipo de expositor tem a grande desvantagem de consumir mais energia que os expositores fechados. Estes contêm mais humidade e exigem mais ciclos de descongelamentos. A barreira entre o produto e o exterior é mantida através de uma cortina de ar, no entanto, esta cortina de ar não é perfeita e permite a infiltração de ar quente para o interior do expositor;
- **Expositor com porta envidraçada:** Este tipo de expositores contêm portas envidraçadas, que lhes permite criar uma barreira entre o interior e exterior do expositor. Deste modo, o consumidor pode observar e seleccionar o produto desejado através da porta envidraçada e para retirar o mesmo do expositor, basta interagir com a porta. Este tipo de equipamento é utilizado maioritariamente para o armazenamento de alimentos congelados, devido à elevada capacidade de conter o ar refrigerado no interior do expositor. As cargas de refrigeração associadas são normalmente menores que as dos expositores abertos, mas por sua vez, são mais elevadas que as do expositor do tipo ilha. Outro problema deste expositor é o fenómeno de embaciamento que ocorre nas portas envidraçadas. Para tal, os mesmos são equipados com “aquecedores” eléctricos nas portas, de modo a tentar evitar esta condição;
- **Plataforma simples e de serviço:** Estes expositores são geralmente utilizados para a exposição de carne fresca, charcutaria ou até de produtos de pastelaria / padaria. Estes encontram-se equipados com portas de correr na zona onde o vendedor retira o produto, e uma protecção envidraçada para exhibir os produtos aos clientes.

Cada um destes expositores foi desenvolvido e aperfeiçoado para aplicações específicas, ou seja, cada um dos expositores anteriormente listados existe especificamente para o armazenamento e exibição de tipos de alimentos específicos. Esta especificidade faz com que cada equipamento de armazenamento apresente também uma temperatura específica de funcionamento.

2.3. Expositores refrigerados

Os expositores verticais refrigerados e de congelação surgiram inicialmente em formato aberto, permitindo aos consumidores interagirem directamente sem barreira alguma, com os produtos. No entanto, os expositores verticais abertos de congelação entraram em

declínio na década de 80 e 90 devido ao seu mau funcionamento e elevado consumo energético. Os expositores abertos eram muitas vezes problemáticos, devido a acumulação de gelo que levava ao bloqueio das condutas dos mesmos. Esta situação causava um mau funcionamento do equipamento e obrigava os proprietários a remover o gelo dos expositores, de modo a que os mesmos pudessem voltar a funcionar corretamente.

Estes problemas levaram a que os proprietários iniciassem a procura por outras alternativas. Assim, aos poucos, os expositores refrigerados fechados foram ganhando cada vez mais ênfase no mercado, em detrimento dos expositores abertos. Ao longo dos anos, os expositores refrigerados abertos foram perdendo terreno, substituídos por expositores com portas, ou expositores “mistos” que combinavam uma zona aberta, com outra fechada. No entanto, os expositores refrigerados abertos são ainda largamente utilizados. (Evans, 2014)

O propósito dos expositores refrigerados é conservar e apresentar o produto de forma atraente, incentivando os clientes a comprá-lo. Grande parte dos alimentos consumidos são perecíveis, portanto, a sua conservação é de primordial importância. Assim, as entidades comerciais utilizam em grande parte expositores refrigerados, de modo a exibir em condições ideais os seus produtos alimentares perecíveis. Como é possível verificar na Figura 5, os expositores de média e baixa temperatura, são responsáveis por cerca de 68% e 32% respetivamente, do total de expositores refrigerados num típico supermercado.

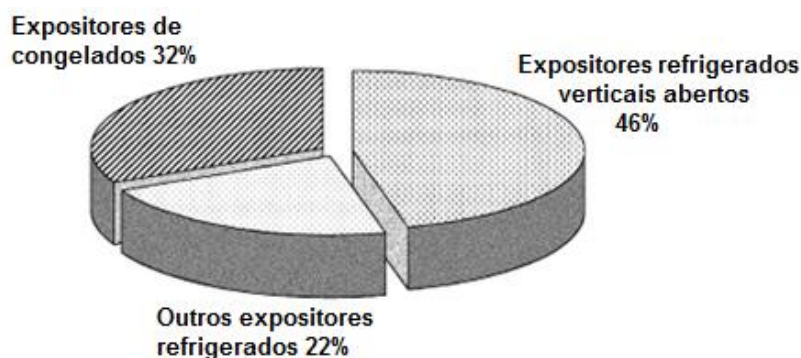


Figura 5 - Distribuição por tipo de expositores refrigerados num típico supermercado (ASHRAE, 2010).

2.3.1. Temperaturas dos produtos

Os expositores refrigerados são projetados para armazenar alimentos e proporcionar a curto prazo, as condições adequadas aos mesmos. Deste modo, é essencial que estes funcionem em perfeitas condições e à temperatura adequada, pois um armazenamento deficiente pode levar a que os consumidores comprem alimentos fora dos parâmetros definidos de segurança alimentar e consequentemente possam sofrer de problemas de saúde. Estima-se que entre 24 a 81 milhões de pessoas, adoecem anualmente devido aos

microrganismos nos alimentos, resultando em cerca de 10 mil mortes anuais. Esta situação reporta para a importância de uma perfeita conservação dos alimentos, de modo a prevenir estas doenças de origem alimentar (ASHRAE, 2010).

O código publicado em 2001 pela *Food and Drug Administration* (FDA), exige que que a temperatura do núcleo da carne, aves, peixes, laticínios e produtos similares não sofram variações mais elevadas que 5°C ao longo do embalamento, transporte, recepção e armazenamento. A manutenção da temperatura adequada do produto depende muito da temperatura do ar descarregado no expositor. Na tabela 1, são apresentadas as temperaturas de descarga do ar refrigerado recomendadas pela ASHRAE em função dos diferentes tipos de produtos que o equipamento expositor alberga.

Tabela 1 - Temperatura do ar descarregado nos expositores refrigerados (Baptista et al., 2007).

Produtos	Tipo de equipamento	Temperatura de descarga (°C)	
		Mínima	Máxima
Laticínios	Expositor aberto	1,1	3,3
Frutas e legumes empacotados	Ilhas	1,7	3,3
	Expositor aberto	1,7	3,3
Carne fresca (área de exposição fechada)	Vitrine	2,2	3,3
Carne fumada	Expositor aberto	0	2,2
Carne empacotada (área de exposição)	Versão única	-4,5	-3,3
	Expositor aberto	-4,5	-3,3
Produtos congelados	Ilhas	-	-25
	Expositor aberto	-	-23
	Expositor fechado	-	-20
Gelados	Ilhas	-	-31
	Expositor fechado	-	-25

Através da tabela anterior, é possível verificar as diferentes aplicações dos diversos expositores e as diferentes temperaturas aplicadas em função do tipo de alimentos/ conservação desejada.

2.3.2. Condições exteriores

O desempenho e consequentemente consumo energético de um expositor é significativamente afetado pela temperatura, humidade e movimento do ar circundante. Os expositores refrigerados são principalmente projetados para supermercados. Atualmente quase todos os estabelecimentos deste ramo contêm ar condicionado no seu interior, de modo a proporcionar mais conforto aos clientes. Segundo a ASHRAE 2010, as condições ambientais nos supermercados encontra-se em torno dos parâmetros apresentados na tabela 2.

Tabela 2 - Condições ambiente nas lojas de comércio alimentar nos EUA (ASHRAE, 2010).

Estação	Temperatura de bolbo seco (°C)	Temperatura de bolbo húmido (°C)	Humidade absoluta (g _{água} /kg _{ar seco})	HR%
Inverno	20,6	12,2	5,4	36
Primavera	21,1	14,4	7,9	50
Verão	21,7	16,1	9,1	56
Outono	21,1	14,4	7,9	50

Este estudo apresentado pela ASHRAE, revelou que a temperatura do ar ambiente em supermercados nos Estados Unidos encontra-se entre 20,6°C e 21,7°C. Apenas 5% de todas as leituras efetuadas durante o estudo apresentaram valores de temperatura de bolbo seco acima dos 24°C, ou 10,2g de humidade por cada quilograma de ar seco (db). Baseando-se nestes dados, a indústria selecionou 24°C (bolbo seco) e 18°C (bolbo húmido), (55% de humidade relativa e 14,2°C de temperatura de ponto de orvalho) como as condições de projeto de verão. Desta forma, estas são as condições ambiente para as quais é avaliada a carga de refrigeração dos expositores em lojas de comércio alimentar. Na Europa, a homologação destes equipamentos segue a Norma ISO 23953 (2005). Os fabricantes dos equipamentos utilizam usualmente a classe climática n.º 3 (25°C de temperatura de bolbo seco e 60% de humidade relativa, correspondendo a uma temperatura de ponto de orvalho de 16,7°C) no projeto dos equipamentos.

A humidade do ar é um dos parâmetros mais importantes no desempenho dos expositores refrigerados. No entanto, este parâmetro depende da localização climática da loja, das mudanças sazonais e ainda de outro fator muito importante: a desumidificação da loja ou do próprio sistema de climatização da mesma.

A Figura 6 apresenta um exemplo da relação entre o condensado recolhido e a humidade relativa do ar em diferentes tipos de expositores refrigerados.

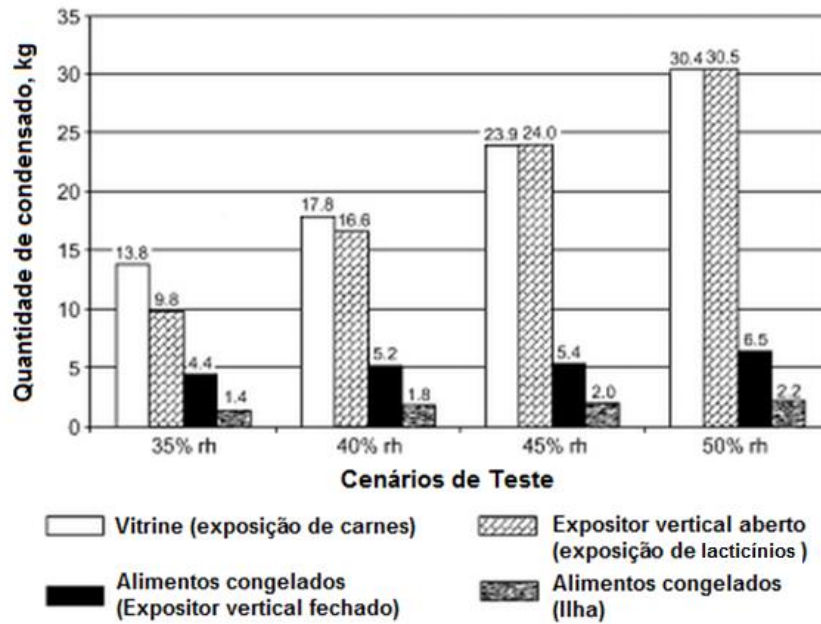


Figura 6 - Condensado recolhido em função da humidade relativa por tipo de expositores refrigerados (ASHRAE, 2010).

A acumulação de gelo no evaporador e consequentemente aumento do peso de condensado é mais drástico nos expositores refrigerados verticais abertos. Em suma, os expositores abertos demonstram uma maior vulnerabilidade às variações de humidade do ar e removem mais humidade do ambiente da loja que os outros tipos de equipamentos de refrigeração. A formação de gelo aumenta em ambientes com humidade relativa mais elevada. Esta situação acarreta problemas para os expositores, visto que leva a um aumento das cargas latentes (Figura 7) e faz com que os equipamentos necessitem de remover as mesmas, consumindo mais energia. Deste modo, pode ser necessário proceder a descongelações adicionais para manter o produto à temperatura desejada.

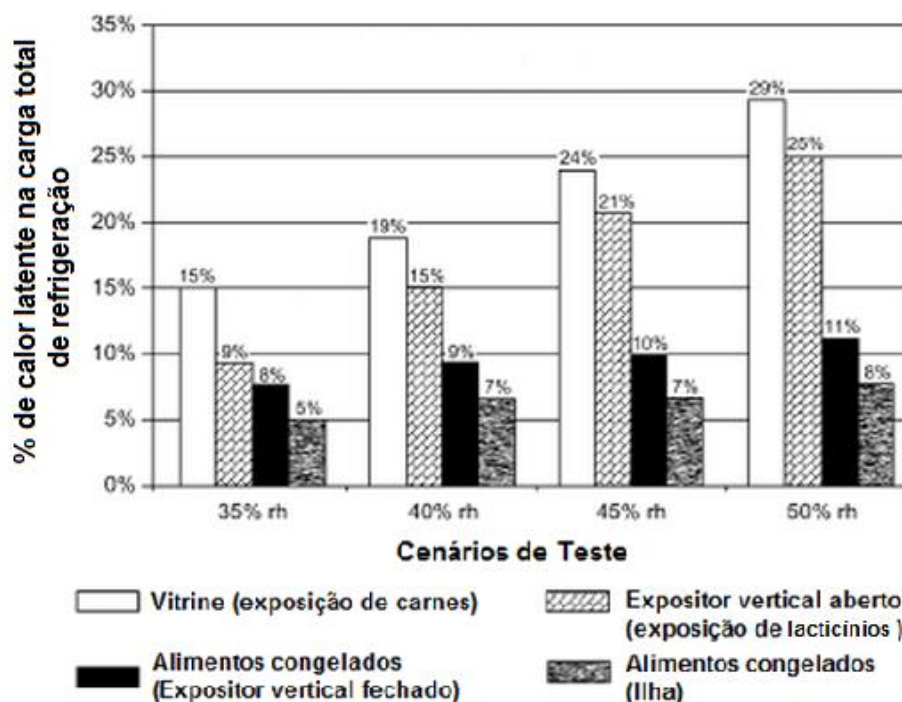


Figura 7 - Percentagem de calor latente na carga total de refrigeração em função da umidade relativa por tipo de expositor refrigerado (ASHRAE, 2010).

Quando o armazenamento é feito com uma umidade relativa do ar exterior diferente daquela para a qual os expositores foram classificados, os requisitos energéticos para o funcionamento do equipamento, variam. Deste modo, os responsáveis pelas lojas devem verificar se as condições ambiente da loja se encontram dentro dos limites estipulados pelos expositores. Assim, caso a umidade relativa do ar se encontre em níveis abaixo dos estipulados, o ponto de orvalho também diminui e conseqüentemente o sistema de refrigeração não necessita de manter o funcionamento para níveis de umidade mais elevados, permitindo uma poupança energética.

2.3.3. Dispositivos de anti-embaciamento em superfícies envidraçadas

O processo de embaciamento é um fenômeno de grande interesse em diversos campos, devido aos problemas de visibilidade que causa. O embaciamento de uma superfície envidraçada ocorre quando o vapor de água do ar entra em contacto com uma superfície cuja temperatura é inferior à temperatura de ponto de orvalho do ar. Ao entrar em contacto com a superfície, o vapor de água sofre uma redução de temperatura e conseqüentemente passa para o estado líquido (condensação). A temperatura à qual a condensação ocorre (ponto de orvalho), depende da quantidade de umidade no ar ambiente circundante. Deste modo, como é possível observar na Figura 8, um ar mais

húmido, tem um ponto de orvalho mais elevado, quando comparado com um ar mais seco, que sofre condensação a temperatura mais baixa.

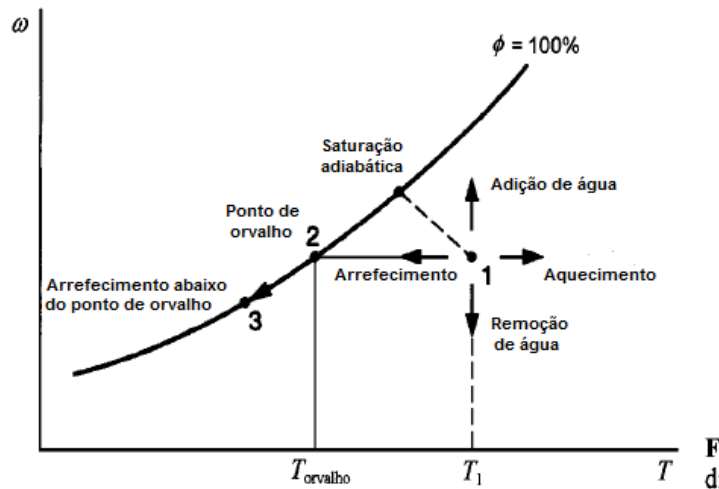


Figura 8 - Diagrama psicométrico simplificado (Pinheiro, 2011).

O fenômeno de embaciamento é uma das principais preocupações do setor automóvel, ou das indústrias aeronáuticas onde é necessário um rápido processo de desembaciamento do para-brisas dos veículos ou aeronaves, a fim de garantir uma visibilidade adequada e preservar a segurança dos passageiros.

Em refrigeração comercial, o grande problema do fenômeno de embaciamento refere-se à deposição de condensado nas superfícies envidraçadas dos expositores refrigerados, especialmente nos expositores de alimentos congelados. Assim, quando ocorre a abertura da porta, o vapor de água contido no ar exterior introduz-se no interior do expositor e conseqüentemente condensa na superfície envidraçada. Esta situação causa grande embaraço para as lojas, pois devido a este fenômeno, os consumidores não conseguem visualizar em perfeitas condições o produto no interior do expositor e necessitam de abrir a porta do mesmo, levando a um agravamento do embaciamento da superfície ou em casos extremos, até abdicando até de realizar a compra. Deste modo, é necessário aplicar sistemas de anti-embaciamento nos expositores de refrigeração / congelação, para evitar este embaraço para consumidores e vendedores (D'Agaro *et al.*, 2006).

Regra geral, estes sistemas são constituídos por resistências elétricas colocadas em torno da moldura da porta envidraçada, que através da passagem de corrente pelas mesmas, produzem calor com a finalidade de evitar a condensação na superfície envidraçada e nas superfícies metálicas da porta. Estes aquecedores podem apresentar um tamanho considerável com um consumo aproximado de 200 W/porta (Walker *et al.*, 2004). Contudo, o grande problema destes dispositivos reside, na maioria dos casos, na sua operação contínua, que se repercute num consumo significativo de energia elétrica. A configuração

típica de um expositor refrigerado que possua estes dispositivos é apresentada na Figura 9 (Faramarzi, 2008).



Figura 9 - Localização típica dos dispositivos anti embaciamento (Faramarzi, 2008).

- **Aquecedores colocados nos caixilhos (verde na Figura 9)** - localizados dentro do quadro da porta para evitar que a mesma não fique presa com a formação de gelo (apenas se aplicam em expositores de congelação);
- **Aquecedores colocados na moldura da porta (vermelho na Figura 9)** - estão localizados na moldura da porta com o intuito de evitar a formação de gelo na porta, e conseqüentemente que a mesma fique presa. Para além disto, estes dispositivos proporcionam também, um pouco de calor para a zona limite da superfície envidraçada.
- **Aquecedores colocados no vidro (azul na Figura 9)** - localizados no próprio vidro para aumentar a temperatura da superfície e evitar a formação de condensado.

Para contornar o problema do consumo contínuo por parte destes aquecedores, é possível aplicar-lhes métodos de controlo para humidade relativa do ar abaixo de 55% (ASHRAE, 2010). No entanto, os fabricantes especificam que apenas os aquecedores aplicados no vidro podem ser controlados, de modo a reduzir o seu consumo. Os controladores mais utilizados nestes aquecedores, são sensores de humidade e/ou temperatura que permitem monitorizar os valores das grandezas no interior ou exterior do expositor enviando o sinal obtido para o controlador. Este último, ajusta o ciclo de trabalho dos dispositivos de anti-embaciamento (resistências elétricas) de acordo com os níveis obtidos pelos sensores. Assim, caso o ar contenha pouca humidade, a temperatura de ponto de orvalho será baixa e conseqüentemente, os aquecedores são colocados a operar num ciclo mais baixo. No

entanto, caso a humidade do ar seja elevada, os aquecedores operam a 100%, de modo a evitar o embaciamento da superfície envidraçada do expositor. Em suma, o ciclo de trabalho é ajustado consoante a temperatura de ponto de orvalho medida (Faramarzi, 2008).

Para além do consumo energético, os aquecedores de anti-embaciamento em expositores refrigerados também acarretam uma carga térmica para o sistema de refrigeração. Portanto, qualquer redução, quer da potência térmica quer do tempo de funcionamento dos mesmos, para além de diminuir o consumo energético dos aquecedores, também acarreta benefícios secundários para o lado da refrigeração, pois o tempo de funcionamento do compressor irá ser menor, e em consequência o consumo energético do equipamento também.

2.3.4. Carga de refrigeração de um expositor refrigerado fechado

Os expositores refrigerados são utilizados para conservar alimentos perecíveis, fornecendo as temperaturas de armazenamento desejáveis. O sistema de refrigeração controla a temperatura de armazenamento dos produtos, removendo todos os ganhos de calor do expositor. A transferência de calor nos expositores refrigerados envolve interações com o ambiente circundante e ambiente interno do expositor. As componentes de calor a partir do ambiente circundante incluem a transmissão (ou condução), a radiação e a infiltração. Por sua vez, as componentes de calor do ambiente interno incluem a iluminação, o(s) ventilador(es) e o produto colocado no expositor. No entanto, para além destas interações anteriormente mencionadas, o descongelamento da superfície do evaporador do expositor e os dispositivos de anti-embaciamento (aquecedores) também são responsáveis por uma percentagem da carga térmica num expositor refrigerado. A Figura 10 permite observar a ponderação das cargas térmicas em expositores refrigerados aberto e fechado.

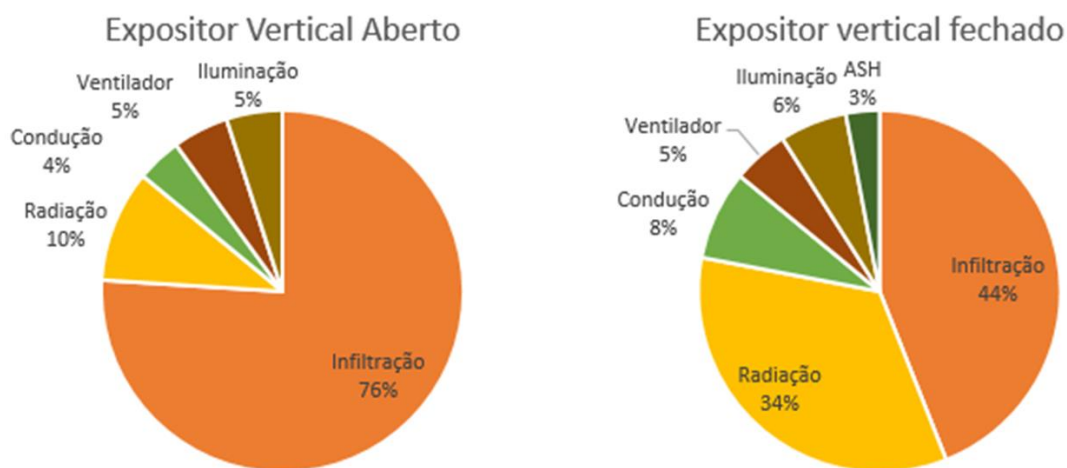


Figura 10 - Comparação das cargas térmicas de um expositor refrigerado aberto e fechado (Evans, 2014).

Um expositor refrigerado aberto, não tem uma barreira de proteção considerável entre o interior e exterior e portanto sofre uma interação mais elevada por parte da infiltração de ar exterior. Contudo, os expositores refrigerados fechados apresentam uma percentagem mais elevada relativamente a radiação. Além disto, os dispositivos anti-embaciamento apresentam uma carga térmica de 3% no expositor refrigerado fechado, ao contrário do expositor aberto, que não possui este tipo de sistema.

Apesar da carga térmica proveniente do sistema anti-embaciamento ser a mais pequena, quando comparado com as outras cargas térmicas dos expositores fechados, é o único onde será mais simples e barato atuar. A infiltração contribui com 44% da carga térmica total num expositor refrigerado, portanto o mais sensato seria reduzir a mesma. No entanto, para se combater a infiltração neste tipo de expositores, teria que se adicionar uma cortina de ar, para aquando da abertura da porta ocorrer uma menor infiltração. Esta cortina de ar, apesar de combater a entrada de ar exterior para o interior do expositor, traria mais consumos em relação aos ventiladores e consequentemente maior carga térmica dos mesmos. A radiação, que também é responsável por uma fatia elevada da carga térmica (34%), pode ser reduzida em parte através da aplicação de iluminação LED. A condução pode ser reduzida através da melhoria do isolamento das paredes do expositor. Existem cada vez mais, soluções inovadoras para combater a mesma, tal como parede dupla com vácuo no seu interior, evitando/diminuindo a propagação de calor exterior por condução. No entanto, estas soluções inovadoras acarretam custos elevados, o que levaria a um período de retorno do investimento inicial, bastante elevado.

A carga de refrigeração de um expositor refrigerado típico apresenta duas componentes, as cargas térmicas sensíveis e latentes. Segundo Faramarzi (1999), estas podem ser determinadas da seguinte forma:

$$Q_{\text{expositor}} = [Q_C + Q_r + Q_{is} + Q_l + Q_{fans} + Q_{pd} + Q_{ASH} + Q_{ps}]_{\text{sensível}} + [Q_{il} + Q_{pr}]_{\text{latente}} \quad [1]$$

Em que:

- $Q_{\text{expositor}}$ - Capacidade de refrigeração do expositor, W;
- Q_C - Ganho de calor por condução, W;
- Q_r - Ganho de calor por radiação, W;
- Q_{is} - Ganho de calor sensível por infiltração de ar, W;
- Q_l - Ganho de calor pela iluminação, W;
- Q_{fans} - Ganho de calor pelo(s) ventilador(es), W;
- Q_{pd} - Ganho de calor pelo aquecedor de descongelamento, W;
- Q_{ASH} - Ganho de calor pelos aquecedores de anti-embaciamento, W;
- Q_{ps} - Ganho de calor para redução da temperatura inicial do produto, W;
- Q_{il} - Ganho de calor latente por infiltração de ar, W;
- Q_{pr} - Calor latente da respiração do produto, W.

2.3.4.1. Carga térmica por condução

A carga térmica por condução refere-se à transmissão de calor através do invólucro do expositor refrigerado. A diferença de temperatura entre o ambiente exterior e o interior do expositor é a principal força motriz para a transferência de calor por condução.

Após determinação do coeficiente global de transferência de calor do expositor, a carga térmica por condução pode ser quantificada através da Equação 2 (Faramarzi, 1999).

$$Q_C = U \times A \times (T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}) \quad [2]$$

Onde:

- U - Coeficiente global de transferência de calor, W/m²°C;
- A - Área das superfícies; m²;
- T_{ext} - Temperatura de bolbo seco do ar exterior, °C;
- T_{int} - Temperatura de bolbo seco do ar no interior do expositor, °C.

2.3.4.2. Carga térmica da temperatura inicial dos produtos

A carga térmica resultante da redução da temperatura inicial dos produtos para a adequada temperatura de conservação apresenta duas componentes (ASHRAE, 2010):

Colocação do produto no expositor: Esta carga é causada pela colocação do produto no interior do expositor a uma temperatura mais elevada que a temperatura de

armazenamento designada. É a quantidade de arrefecimento requerida para baixar a temperatura do produto para a temperatura desejada.

A carga térmica resultante deste fenómeno pode ser obtida através da seguinte Equação 3.

$$Q_{ps} = m \times C_p \times (T_s - T_f) / \Delta t \quad [3]$$

Em que:

- Q_{ps} - Ganho de calor por colocação do produto no expositor, W;
- m - massa do produto, kg;
- C_p - Calor específico do produto, J/kg·°C;
- T_s - Temperatura inicial do produto, °C;
- T_f - Temperatura de conservação do produto, °C;
- Δt - Tempo necessário para colocar o produto a temperatura desejada, s.

Descongelação: Durante o ciclo de descongelação, ocorre um aumento da temperatura do produto que se encontra no interior do expositor. Após a finalização deste processo, o sistema de refrigeração liga e diminui novamente a temperatura do produto para o valor estipulado.

A carga térmica oriunda deste processo é obtida através da Equação 4 (Faramarzi, 1999).

$$Q_{pd} = m \times C_p \times (T_{pd} - T_i) / \Delta t \quad [4]$$

Onde:

- Q_{pd} - Ganho de calor pelo aumento da temperatura dos produtos decorrente do processo de descongelamento do evaporador do expositor, W;
- m - massa do produto, kg;
- C_p - Calor específico do produto, J/kg·°C;
- T_{pd} - Temperatura após a descongelação do evaporador; °C;
- T_i - Temperatura final desejada (temperatura a que o expositor opera normalmente), °C;
- Δt - Tempo necessário para colocar o produto a temperatura desejada, s.

2.3.4.3. Carga térmica dos dispositivos de anti- embaciamento

A carga térmica proveniente destes dispositivos refere-se à porção de energia elétrica que acaba como calor sensível no interior do expositor refrigerado. A contribuição da carga de refrigeração destes dispositivos num expositor refrigerado típico, pode atingir 35% do consumo elétrico (ASHRAE, 2010).

A carga térmica resultante destes dispositivos é dada pela Equação 5 (Faramarzi, 1999).

$$Q_{ASH} = P \times k_1 \quad [5]$$

Em que:

- P - potência dos dispositivos de anti-embaciamento, W;
- k_1 - Fração (%) de calor dissipado para o interior do expositor.

2.3.4.4. Carga térmica por radiação

O calor ganho pelo expositor refrigerado por radiação térmica encontra-se dependente de várias condições. Depende da temperatura das superfícies no interior e exterior do expositor, da emissividade das superfícies, da área superficial das mesmas e do fator de forma em relação ao ambiente (paredes/objetos).

A carga térmica por radiação por ser quantificada através da Equação 6 (Faramarzi, 1999).

$$Q_{rad} = \frac{\sigma(T_w^4 - T_c^4)}{\left[(1 - \epsilon_w)\epsilon_w A_w + \frac{1}{A_w F_{c-w}} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} A_c \right]}$$

[6]

Onde:

- Q_{rad} - Transferência de calor por radiação entre as paredes exteriores e o expositor refrigerado, W;
- σ - Constante de Stefan-Boltzmann, $5,6704 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;
- T_w - Temperatura das paredes da loja, K;
- T_c - Temperatura das superfícies no interior do expositor, K;
- ϵ_w - Emissividade das paredes da loja;
- ϵ_c - Emissividade das superfícies no interior do expositor;
- A_w - Área total das superfícies da loja, m^2 ;
- A_c - Área total das superfícies do interior do expositor, m^2 ;
- F_{c-w} - fator de forma do expositor para as superfícies da loja.

2.3.4.5. Cargas(s) térmica(s) interna(s)

A(s) carga(s) térmica(s) interna(s) do expositor provém maioritariamente da sua iluminação e dos motores dos ventiladores do evaporador. As lâmpadas e os motores dos ventiladores encontram-se normalmente localizados dentro do limite termodinâmico do expositor, portanto, a dissipação de calor dos mesmos deve ser considerada como parte da carga térmica do expositor.

Segundo Faramarzi (1999), para a determinação das cargas térmicas internas do expositor, são utilizadas a Equação 7 e Equação 8.

$$Q_{fans} = W_{fans} \quad [7]$$

$$Q_l = W_l \times k_1 \quad [8]$$

Em que:

- Q_{fans} - Carga térmica devido aos motores dos ventiladores, W;
- Q_l - Carga térmica proveniente da iluminação do expositor, W;
- W_l - Potência da iluminação interior do expositor, W;
- W_{fans} - Potência dos motores dos ventiladores, W;
- k_1 - Percentagem de calor fornecido ao expositor em função da localização da lâmpada e do balastro.

2.3.4.6. Carga térmica por infiltração

A carga térmica por infiltração constitui o ganho de calor associado à entrada de ar ambiente. Ao contrário dos expositores refrigerados abertos, os expositores fechados não sofrem uma carga de infiltração tão elevada e não depende dos mesmos fatores. Aqui, a quantidade de carga térmica por infiltração de ar depende essencialmente dos seguintes fatores:

- Tempo de abertura das portas;
- Temperatura do ar de armazenamento do expositor;
- Rácios de humidade.

A carga de infiltração apresenta duas componentes, a sensível e a latente.

Carga sensível: A componente sensível da infiltração de ar refere-se ao calor diretamente adicionado pela diferença de temperatura entre o ar frio no expositor e o ar ambiente da loja aquando da abertura da porta. Segundo Faramarzi (1999), a porção correspondente à carga sensível de infiltração de ar é dada pela Equação 9.

$$Q_{senseinf} = \rho \times V \times C_p \times (T_{room} - T_{case}) \quad [9]$$

Onde:

- $Q_{senseinf}$ - Carga térmica por infiltração de ar correspondente ao calor sensível, W;
- ρ - Massa volúmica, kg/m³;
- V - Caudal de ar que se infiltra para o interior do expositor, m³/s;

- C_p - Calor específico, J/kg·°C;
- T_{room} - Temperatura do ar exterior, °C;
- T_{case} - Temperatura do ar no interior do expositor, °C.

Carga latente: A porção latente de infiltração de ar refere-se ao teor de calor adicionado pela humidade do ar exterior, aquando da infiltração do ar exterior para o interior do expositor refrigerado. A parte correspondente à carga latente de infiltração de ar é obtida através da Equação 10 (Faramarzi, 1999).

$$Q_{il} = \rho \times V \times C_p \times (W_{room} - W_{case}) \times h_{fg} \quad [10]$$

Em que:

- ρ - Massa específica do ar, kg/m³;
- V - Caudal de ar que se infiltra para o interior do expositor, m³/s
- C_p - Calor específico, J/kg·°C;
- W_{room} - Humidade absoluta do ar no ambiente exterior, kg/kg_{ar};
- W_{case} - Humidade absoluta do ar no interior do expositor, kg/kg_{ar};
- h_{fg} - calor latente de vaporização da água, J/kg.

2.3.4.7. *Carga térmica por respiração e transpiração dos produtos*

Após colheita é impossível aos produtos de origem vegetal restituírem os hidratos de carbono e água. A respiração é o processo biológico onde os materiais orgânicos (hidratos de carbono), são sintetizados em produtos mais simples, com libertação do calor. Nesta reação é produzido dióxido de carbono e água e consumido oxigénio (Pinto e Morais, 2000). Os hidratos de carbono, durante a respiração, vão ser utilizados até se esgotarem.

A transpiração é a água que é evaporada dos tecidos, no entanto os frutos, após separação da planta mãe, não conseguem repor a água perdida. Assim, estes dois processos que ocorrem nos produtos hortofrutícolas, correspondem a uma carga latente obtida através da Equação 11.

$$Q_{pr} = m_v \times A_{sup} \times N \times h_{fg} \quad [12]$$

Em que:

- m_v - Taxa de transferência de massa de vapor de água que resulta da respiração/transpiração do produto, kg/s·m²;
- A_{sup} - Superfície do produto, m²;
- N - quantidade de produtos;
- h_{fg} - calor latente de vaporização da água, J/kg.

2.4. Estudos experimentais e numéricos

Faramarzi *et al.* (2001) elaboraram um estudo para comparar duas tecnologias diferentes de eficiência energética aplicadas aos dispositivos de controlo de embaciamento de expositores. Os testes efetuados permitiram comparar o desempenho dos controladores de modulação de pulso e portas com polímeros especiais em expositores refrigerados fechados de alimentos congelados em três cenários diferentes: 55%, 45% e 35% de humidade relativa no interior do expositor a uma temperatura exterior constante de 24°C. O controlador de pulso foi programado para fornecer uma potência máxima quando atingida uma humidade relativa do ar igual a 55%, e para valores mais baixos a potência era reduzida em conformidade. Os resultados obtidos demonstram que através da aplicação destas tecnologias, o consumo energético diminui para humidades relativas do ar inferiores a 55% (Figura 11).

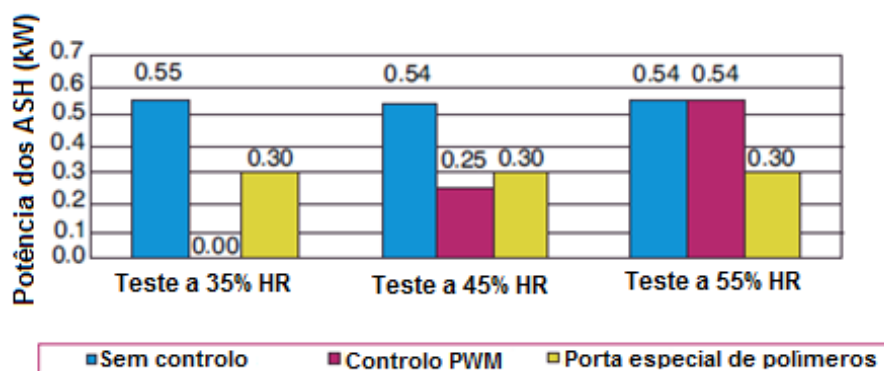


Figura 11 - Consumo energético dos dispositivos anti embaciamento em função da humidade nos 3 cenários (Faramarzi et al., 2001).

Por sua vez, o tempo de desembaciamento obtido não apresenta grande variação para o cenário de dispositivo sem controlo, (37s para 35% e 41s para 55% de humidade relativa), para o controlo de modulação os tempos obtidos foram de 44s, 48 e 51s enquanto que a porta com polímeros especiais foi a que apresentou maior discrepância para humidades diferentes, variando de 43s a 35% para 73s a 55%.

Faramarzi *et al.* (2010) efetuaram testes laboratoriais para quatro tipos de expositores diferentes, variando a humidade relativa do ambiente exterior (35%, 40%, 45%, 50% e 55%) a uma temperatura constante de 24°C. O estudo realizado teve como principal objetivo, avaliar o impacto da redução da humidade relativa do ar no interior dos expositores, verificando a sua influência no consumo dos mesmos. Os resultados obtidos mostram que os expositores abertos verticais são os mais vulneráveis às mudanças de humidade do ar do ambiente exterior, até porque a infiltração nos mesmos apresenta valores em torno de 80%

da carga total de refrigeração do expositor. Uma redução da humidade relativa do ar de 55% para 35% permitiu diminuir a carga de infiltração latente em 74% e o consumo energético por parte do compressor em 19,6%. Além deste resultado, o estudo em questão permitiu verificar que baixando a humidade relativa do ar de 50% para 35% ocorre uma redução de 69,2% do tempo de desembaciamento das portas envidraçadas. Conclusões similares foram obtidas por Gaspar *et al.* (2011).

Rauss *et al.* (2008) apresentaram dados laboratoriais de diversas tecnologias de eficiência energética para expositores refrigerados. As medidas apresentadas pelos mesmos focaram-se na melhoria da iluminação, na aplicação de uma película anti-embaciamento e uma melhoria nas juntas das portas envidraçadas, com o intuito de diminuir o consumo energético destes expositores. Os dados apresentados, demonstraram que a película anti-embaciamento é altamente suscetível a danos. Após vários ciclos de variação da temperatura de congelação para a temperatura ambiente, a película começou a descamar da superfície envidraçada. Os autores concluíram que este problema ocorre devido à migração da humidade para a fronteira entre a película e a superfície, seguida do congelamento da mesma, resultando na separação da película da superfície.

Fricke & Becker (2010) compararam o consumo global de energia de uma linha de expositores refrigerados abertos com uma linha de expositores refrigerados fechados. Para esta pesquisa, foram selecionados dois supermercados como local de teste, tendo um deles recebido a linha de expositores abertos e o outro, os expositores fechados. A Figura 12 apresenta os resultados do consumo obtido. Através da análise dos mesmos, os autores concluíram que os expositores abertos consumiram cerca de 1,3 mais energia que os fechados ao longo do tempo. Em relação aos expositores fechados, os dados obtidos demonstraram que os dispositivos de anti-embaciamento consumiram cerca de 15% da energia total consumida.

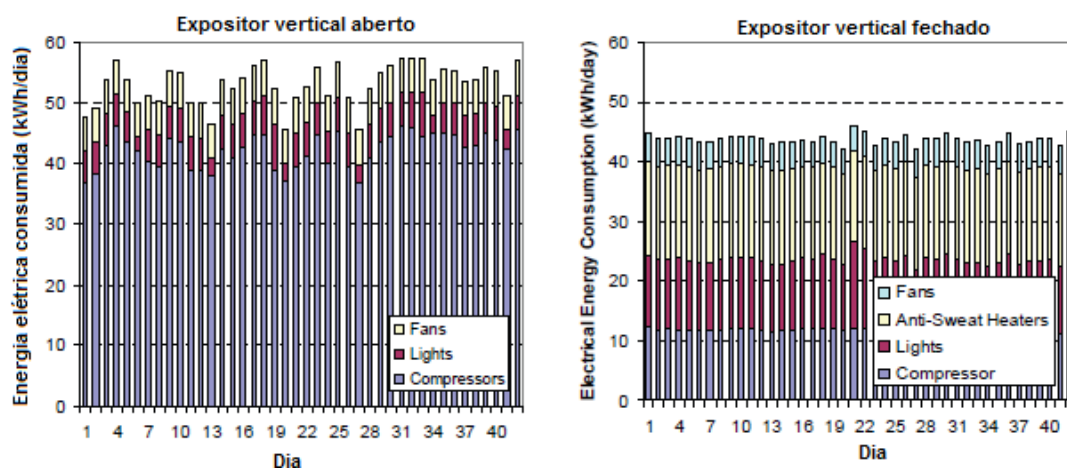


Figura 12 - Consumo de energia elétrica por componente nos expositores refrigerados abertos e fechados, durante o período de teste (51 dias) (Fricke & Becker, 2010).

Durante o período de testes (51 dias), foram registadas 4792 aberturas das portas dos expositores refrigerados fechados. Foi verificado que 90% destas aberturas apresentava duração menor que 60 segundos, no entanto o tempo de abertura mais comum foi registado em 5 segundos.

A *Dixell Asia* (2010) realizou um estudo da aplicação de uma película anti-embaciamento num expositor refrigerado. Foram realizados dois ensaios num expositor refrigerado com uma temperatura do ar interna de -20°C e com uma humidade relativa do ar exterior de 48%, apenas variando a temperatura de $26,2^{\circ}\text{C}$ para $26,4^{\circ}\text{C}$. Os resultados obtidos demonstram que a película anti embaciamento impede a formação de condensado na superfície envidraçada do expositor. Segundo os resultados obtidos, esta tecnologia, permite que os dispositivos anti-embaciamento aplicados no vidro, sejam retirados ou colocados a funcionar com um consumo mais baixo, podendo ser atingida uma economia até 35%. No entanto, o grande senão apresentado no estudo efetuado, é o facto de esta película ser suscetível a danos, descamando da superfície envidraçada ao longo do tempo.

A *Southern California Edison* (2003) realizou um estudo com o objetivo de avaliar o impacto da aplicação de portas envidraçadas num expositor refrigerado vertical aberto, dando ênfase aos seguintes parâmetros:

- Consumo energético dos motores dos ventiladores, da iluminação, do compressor e dos dispositivos de anti-embaciamento;
- Quantidade de condensado recolhido no final de cada teste;
- Temperatura do produto em vários locais do expositor.

Foi realizado um primeiro ensaio com o expositor refrigerado aberto, anotando os consumos obtidos. Posteriormente, foram adaptadas portas envidraçadas ao expositor aberto, e realizado um segundo ensaio nas mesmas condições exteriores. A fim de evitar o embaciamento da superfície envidraçada, foram colocados dispositivos de anti-embaciamento na porta envidraçada. Os resultados apresentados demonstram que com a aplicação das portas a infiltração para o interior do expositor diminuiu. Como resultado desta aplicação, o consumo de energia pelo compressor diminuiu em 87%, a massa de condensado recolhido do interior do expositor diminuiu em 88%, a carga de arrefecimento foi reduzida em 68% e a temperatura do produto diminuiu 4,6°C.

A *DTE energy* (2012) apresentou um caso de estudo num supermercado sediado na cidade de Detroit, nos Estados Unidos da América. O estudo em questão, apresenta os investimentos em eficiência energética que o proprietário do estabelecimento efetuou no mesmo e os resultados obtidos. De modo a diminuir a fatura energética, o proprietário decidiu instalar termóstatos programáveis, aquecedores de infravermelhos, 22 controladores para os dispositivos de anti-embaciamento, 84 cortinas para os expositores refrigerados abertos, entre outros. Como resultado, a aplicação dos controladores nos dispositivos de anti-embaciamento permitiu ao proprietário obter uma poupança energética anual estimada em US\$ 2.700 anuais, o que permitiu pagar o investimento dos mesmos em menos de 4 meses.

D'Agaro *et al.* (2006) desenvolveram um estudo numérico por Dinâmica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics - CFD) para a simulação do fenómeno de embaciamento e desembaciamento numa porta envidraçada de um expositor refrigerado fechado. Foi aplicado um conjunto de rotinas para a simulação da evolução instável da camada de água na superfície envidraçada, para as equações de energia e de *Navier Stokes* no interior do expositor e para o problema de condução na superfície envidraçada. O coeficiente de transferência de calor por convecção no lado exterior da porta foi avaliado recorrendo a correlações empíricas. Os códigos foram iterados simultaneamente para reproduzir o transiente físico, antes, durante e após a abertura da porta. Foram também analisadas as configurações de ligado ($100\text{W}/\text{m}^2$) e desligado, dos dispositivos de anti-embaciamento no interior do vidro do expositor. Os resultados obtidos em relação aos dispositivos de anti-embaciamento embutidos na porta envidraçada, forneceram informação fiável sobre os tempos de desembaciamento esperados, permitindo observar a variação da quantidade de condensado na superfície ao longo do tempo (Figura 13).

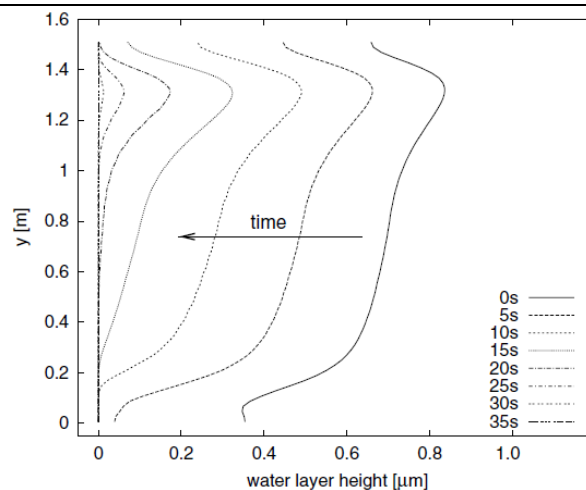


Figura 13 - Previsão numérica da evolução da camada de condensado durante a atuação dos dispositivos de anti-embaciamento (D' Agaro et al., 2006).

Coonrod (2012) criou o sistema apresentado na Figura 14 para as portas dos expositores refrigerados, que inclui um motor elétrico e um ventilador. Este sistema foi criado com o intuito de fornecer uma cortina de ar para a superfície envidraçada do expositor, com a finalidade de evitar o embaciamento da mesma. O motor está configurado para operar a uma velocidade nominal quando o sensor indica que a porta do expositor se encontra fechada. Após a abertura da porta, o sensor dá a indicação ao sistema que é necessário operar a uma velocidade inferior. Quando a porta do expositor é fechada, o sensor avisa novamente o sistema e esta passa a atuar a uma velocidade máxima durante o tempo estabelecido pelo temporizador.

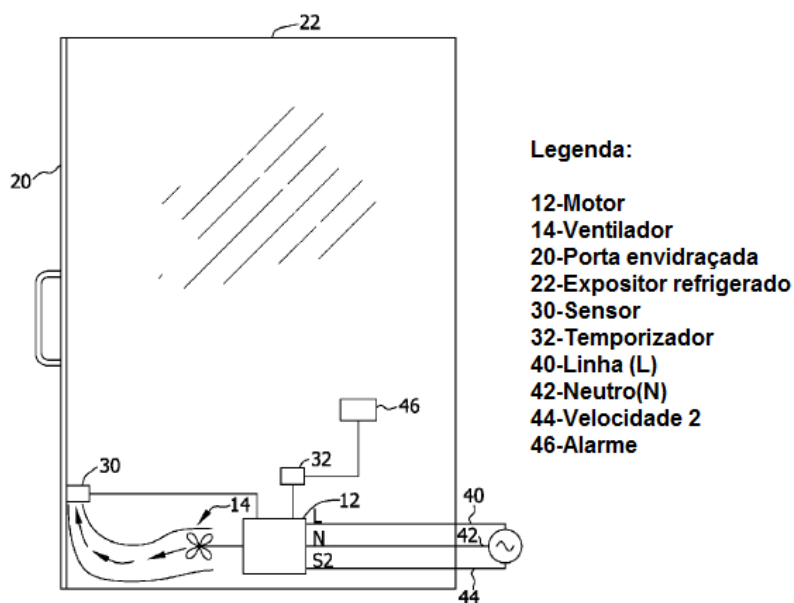


Figura 14 - Desenho do sistema criado para os expositores refrigerados fechados (Coonrod 2010).

Taras *et al.* (2010) desenvolveram o sistema apresentado na Figura 15, com um dispositivo termoelétrico a fim de controlar o embaciamento em superfícies envidraçadas em expositores refrigerados, bem como a formação de gelo no interior dos mesmos. Devido ao funcionamento do ventilador, a superfície envidraçada sofre um contato direto com o fluxo de ar frio que circula dentro do espaço controlado. O ventilador provoca a movimentação do ar no interior do expositor, este atravessa a junção quente, e posteriormente passa pela superfície envidraçada, evitando o embaciamento da mesma. Após a passagem pela superfície envidraçada, o fluxo de ar atravessa a junção fria, de modo a sofrer uma diminuição de temperatura e o ciclo recomeça novamente. O condensado obtido durante a passagem do fluxo de ar na superfície, é encaminhado para o tabuleiro de drenagem e posteriormente recolhido. Segundo os inventores, este sistema pode ainda ser adaptado com um sensor e temporizador, para que o dispositivo termoelétrico não opere de modo contínuo.

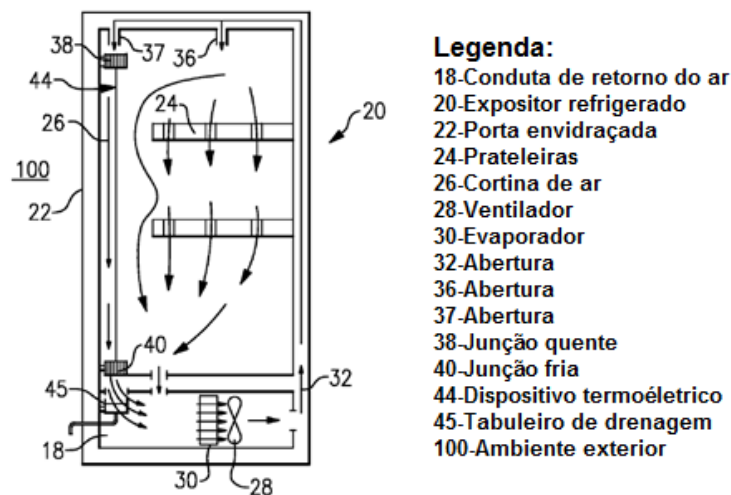


Figura 15 - Figura esquemática de um expositor refrigerado fechado com a incorporação do sistema de desembaciamento criado (Taras *et al.*, 2010).

Veerasamy & Rogueiro (2014) desenvolveram um sistema de remoção de condensação das portas envidraçadas de um expositor refrigerado, através do método de detecção de humidade. Para tal, foi aplicado um circuito de detecção com o auxílio de dois sensores (dois condensadores sensíveis à humidade) no exterior do expositor ligados ao sistema de aquecimento da porta, de modo a evitar o funcionamento contínuo. Este sistema de aquecimento opera em dois modos (Figura 16): o primeiro modo é o “auto”, no qual o sistema é colocado a funcionar aquando da deteção do valor limite de humidade do ar. Por sua vez, o segundo modo, denominado de “manual” entra em funcionamento aquando da abertura da porta. Seja qual for o modo de funcionamento ativo, aquando da não deteção do valor limite de humidade do ar por parte dos sensores, o sistema desliga-se, permitindo uma poupança energética.

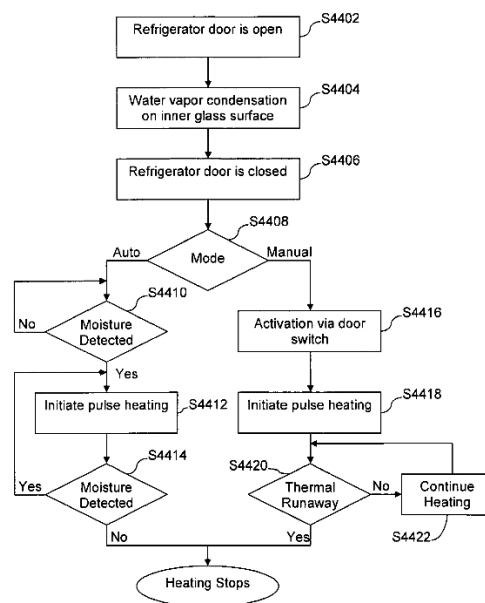


Figura 16 - Fluxograma ilustrativo da aplicação do sensor de humidade em ligação com um expositor refrigerador e respetivos modos de funcionamento (Veerasamy & Rogueiro., 2014)

Sunderland *et al.* (2011) desenvolveram um sistema (Figura 17) para evitar que os dispositivos de anti-embaciamento operem de modo contínuo. O método inclui a deteção de um parâmetro, nomeadamente a humidade do ar do ambiente envolvente adjacente ao expositor, recorrendo a um sensor que fornece um sinal indicativo do parâmetro detetado para um controlador. Após a receção do sinal, o controlador determina o ciclo de trabalho a utilizar com base no valor do parâmetro controlado. Esta invenção, em vez do habitual fio condutor em torno dos vidros e caixilhos da porta envidraçada, utiliza uma película condutora. Deste modo, o controlador encontra-se em comunicação eléctrica com a mesma, regulando a corrente que atravessa a película com base nos sinais recebidos dos sensores, com a finalidade de remover a condensação da superfície envidraçada.

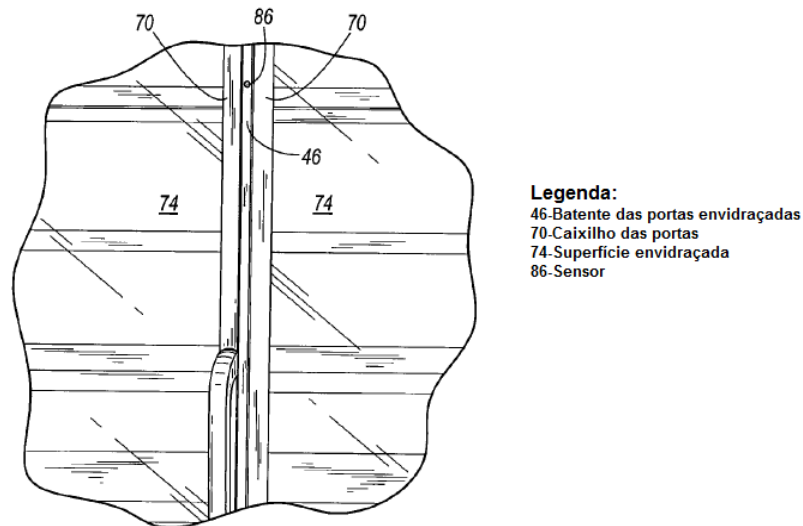


Figura 17 - Vista frontal ampliada do expositor refrigerado, incluindo um sensor do sistema de controlo acoplado ao batente da porta (Sunderland et al., 2011).

2.5. Nota conclusiva

No capítulo que agora termina fez-se uma breve apresentação do estado da arte em torno dos expositores fechados e respetivos sistemas anti-embaciamento. Contudo, de forma a permitir que o leitor obtivesse uma melhor perceção da importância da monitorização dos sistemas anti-embaciamento, foram ainda apresentados os estudos numéricos e experimentais mais importantes desenvolvidos nesta área até então, bem como alguns protótipos.

O presente trabalho tem por base toda a informação apresentada no presente capítulo, com maior ênfase nos trabalhos desenvolvidos pelos autores acima mencionados. Este conjunto de estudos, destinados ao desenvolvimento de sistemas de monitorização e controlo do embaciamento das superfícies vidradas de expositores fechados, atesta a necessidade de efetuar uma correta monitorização do funcionamento dos mesmos, de modo a que seja possível obter um consumo energético menor, por parte destes dispositivos.

No âmbito numérico, é descrito onde surge primeiro o embaciamento numa superfície vidrada. Por sua vez, no âmbito experimental, é apresentada toda uma base de informação acerca dos sistemas desenvolvidos e resultados obtidos. Os detalhes apresentados por estes estudos, permitem estabelecer uma base de informação para a criação do dispositivo anti-embaciamento que será desenvolvido posteriormente no presente trabalho.

3. Monitorização do Embaciamento

3.1. Introdução

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitorização e controlo de embaciamento, com a finalidade de evitar o contínuo consumo energético destes quando aplicados a equipamentos de refrigeração/congelamento. Um dos métodos mais simples para efetuar este tipo de monitorização é através da sensorização de um dos parâmetros envolvidos neste fenómeno, a humidade.

O presente capítulo é dedicado à apresentação do sensor de humidade de baixo custo, desenvolvido para a deteção de humidade no interior do expositor. Contudo, para situar o leitor, são também abordados alguns fundamentos teóricos sobre sensores de humidade. O capítulo inicia-se com uma pequena exposição sobre sensores de humidade, apresentando o seu princípio de funcionamento, seguido de uma pequena comparação entre sensores de humidade do tipo capacitivo e resistivo.

O capítulo prossegue posteriormente para apresentação do sensor de humidade desenvolvido. São apresentados todas as etapas da sua construção, desde a escolha do seu material até à devida simulação do seu comportamento em software *Multisim*. Por fim, é caracterizada a unidade experimental utilizada para a calibração do sensor e são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios experimentais.

3.2. Sensores de humidade

Usualmente, a forma mais comum de medir o conteúdo de humidade do ar é através da humidade relativa. A uma determinada temperatura, a humidade relativa do ar pode ser determinada através da razão entre a quantidade de humidade no ar e a quantidade máxima de vapor de água que o ar pode conter, ou seja, a razão entre a pressão parcial do vapor da água e a sua pressão de saturação. A humidade relativa do ar pode ser expressa através da seguinte equação (Castro, 2011):

$$HR\% = \frac{p_v}{p_{sat}} \times 100\% \quad [13]$$

Em que:

- $HR\%$ - Humidade relativa do ar;
- P_v - Pressão parcial do vapor de água, Pa;
- P_{sat} - Pressão de saturação da água, Pa.

Segundo Castro (2011), um sensor de humidade do ar é um transdutor que converte um estímulo físico ou mecânico, causado pela humidade relativa do ar ambiente, no valor correspondente à humidade relativa do ar.

Contudo, a medida da humidade relativa do ar não é efetuada de maneira direta, mas sim através dos efeitos e mudanças de alguns materiais. Existem diferentes medidores de humidade relativa do ar, com princípios de funcionamento variados: mecânico (baseado na alteração das propriedades mecânicas de um determinado material, tal como o volume, peso ou o próprio tamanho), resistivos (alteração da diferencial de potencial elétrico no material aquando da passagem de corrente elétrica) e capacitivo (alteração da capacidade elétrica de um dielétrico devido à humidade relativa do meio) (Wartchow & Fröhlich, 2013).

3.2.1. Sensores de humidade capacitivos

Os sensores de humidade capacitivos baseiam-se na variação da permissividade dielétrica do filme higroscópico pela humidade relativa do ar do meio envolvente. As características deste tipo de sensores são determinadas pelo tipo de material higroscópico, bem como pelas características e geometria dos elétrodos. A Figura 18 apresenta uma das estruturas básicas de um sensor de humidade capacitivo (Castro, 2011).

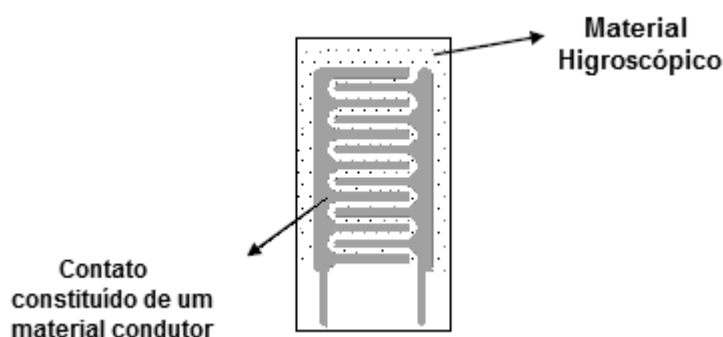


Figura 18 - Sensor de humidade capacitivo (Castro, 2011).

No entanto, para se entender como variam as propriedades elétricas de um sensor de humidade do ar do tipo capacitivo, é necessário conhecer a definição mais básica de um condensador.

Um condensador é um componente do circuito que tem a capacidade de armazenar energia num campo elétrico. Este dispositivo consiste basicamente em duas placas condutoras separadas através de um isolante (material dielétrico). A carga total é zero, pois cada uma das placas armazena cargas iguais, mas opostas quando submetidas a uma

tensão (V). A capacidade elétrica (C) de um condensador de placas paralelas é dada por (Castro, 2011):

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad [14]$$

Onde:

- C - Capacidade elétrica, F;
- ϵ_r - Permissividade relativa;
- ϵ_0 - Permissividade dielétrica do vácuo, $(8,8541878176 \times 10^{-12})$ F/m;
- A - Área dos condutores, m²;
- d - Distância entre as placas condutoras, m.

Quando um sensor de humidade capacitivo absorve água, o valor da sua capacidade elétrica é alterado. A título de exemplo, o valor de ϵ_r da água é de 82 F/m enquanto o valor de ϵ_r do ar é de 1 F/m, ou seja, muito muito menor quando comparado com a água. Em suma, a capacidade elétrica do sistema aumentará com o aumento da humidade relativa do meio (Castro, 2011).

3.2.2. Sensores de humidade resistivos

O sensor de humidade do ar do tipo resistivo é constituído por um material higroscópico cuja resistência sofre uma variação com a humidade relativa do ar. A resistência de um sensor de humidade do ar do tipo resistivo é obtida através da seguinte equação (Castro, 2011):

$$R = \frac{d}{Ane\mu} \quad [15]$$

Em que:

- R - Resistência, Ω ;
- d - Distância entre as placas condutoras, m;
- A - Área dos condutores, m²;
- n - Número de portadores de carga;
- e - Carga elétrica de um eletrão, $(1,6 \times 10^{-19})$ C;
- μ - Mobilidade, m²/(V·s).

A quantidade de moléculas de água dentro do filme higroscópico aumenta aquando do aumento da humidade relativa e da temperatura do ar, devido ao aumento da pressão de vapor. Por sua vez, este aumento leva a uma maior quantidade de iões H⁺ devido à

eletrólise, o que de acordo com a Equação 15, leva a uma diminuição da resistência com o aumento da humidade relativa e temperatura do meio.

3.3. Sensor de humidade desenvolvido

De acordo com o objetivo da presente dissertação, foi desenvolvido um sensor simples e de baixo custo, com o intuito de sensorizar o embaciamento de um expositor refrigerado fechado com portas envidraçadas. Deste modo, e de encontro ao objetivo proposto, optou-se pela montagem de um sensor capacitivo, de duas placas condutoras em paralelo, utilizando o ar no interior do expositor como dielétrico (Figura 19).

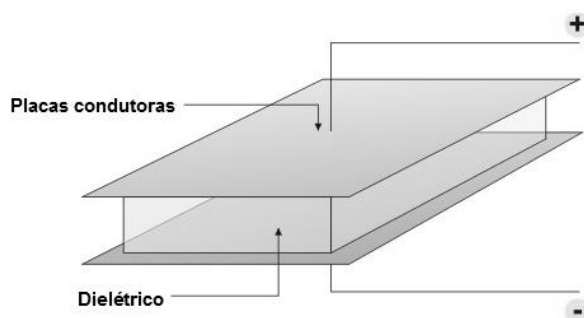


Figura 19 - Estrutura capacitiva seleccionada (adaptado de: Kaur, 2014).

Com o fator de baixo custo sempre a pesar nas decisões de seleção e projeto do sensor, foi selecionado o cobre para as placas condutoras devido à sua elevada condutividade elétrica. Apesar da condutividade elétrica do cobre não apresentar o mesmo valor que a da prata, este é um metal mais fácil de adquirir, mais barato e serve perfeitamente para cumprir com o objetivo proposto (Helmenstine, 2014).

3.3.1. Dimensionamento do circuito

Em relação ao circuito que acompanha o sensor desenvolvido, optou-se por um circuito elétrico com poucos componentes num simples arranjo, de modo a simplificar o sistema e com o intuito de o tornar o mais barato possível. Contudo, antes de proceder à simulação do circuito, foi necessário efetuar o cálculo da capacidade elétrica do condensador.

3.3.1.1. Cálculo da capacidade elétrica do condensador

A primeira etapa para o desenvolvimento do circuito do sensor, passou pelo dimensionamento das placas. As placas de cobre selecionadas para a construção do sensor tiveram em conta o fator tamanho, pois seria desadequado, pouco prático e pouco discreto, colocar umas placas com uma área elevada no interior do expositor. Deste modo, as placas selecionadas possuem as dimensões exibidas na Figura 20.

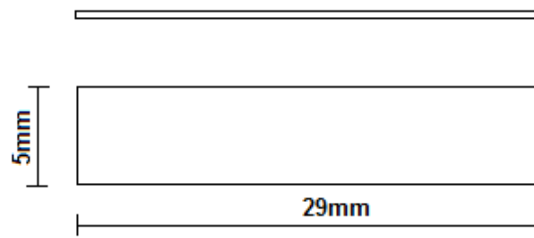


Figura 20 - Dimensões das placas de cobre do sensor de humidade desenvolvido.

Após a seleção das placas, foi necessário determinar que distância aplicar entre as mesmas, com a finalidade de se obter o melhor resultado possível. A distância mínima conseguida entre placas, de modo a evitar o contato entre as mesmas, e permitindo algum espaçamento com o objetivo de evitar um possível acúmulo de gotículas de água entre estas, foi de 0,5 mm. Após o dimensionamento das placas do sensor e da distância entre as mesmas, foi calculado a capacidade elétrica do condensador recorrendo à Equação 14.

A tabela 3 apresenta o valor de capacidade elétrica do condensador para as duas situações extremas: na primeira situação, o ar apresenta 100% de humidade relativa e opostamente, na segunda situação extrema a humidade relativa do ar é de 0%. Apesar de ambos os casos nunca ocorrerem no interior do expositor, a primeira situação foi utilizada para simular o caso extremo e deste modo verificar quais os componentes a utilizar no circuito, enquanto que a segunda situação foi apenas calculada a título de exemplo para a simulação.

Tabela 3 - Capacidade elétrica do condensador para as duas situações extremas (100% e 0% de HR).

ϵ_0	$\epsilon_{r\text{ ar}}$	$\epsilon_{r\text{ água}}$	A (m ²)	d (m)	C (F)
8,85E-12	-	8,50E+01	1,45E-04	5,00E-04	2,18E-10
8,85E-12	1,00E+00	-	1,45E-04	5,00E-04	2,57E-12

Na situação em que o condensador se encontra exposto a um meio com 100% de humidade relativa do ar, o valor da sua capacidade elétrica é de 218 pF. Por sua vez, quando não existe humidade entre as duas placas condutoras, o valor da capacidade elétrica atinge o seu mínimo, 2,57 pF.

3.3.1.2. Componentes eletrónicos

A etapa posterior ao dimensionamento do sensor e cálculo da sua capacidade elétrica, foi a seleção do material necessário para a construção do circuito. Antes da seleção de material algum, foi necessário uma consulta aos componentes disponíveis no laboratório de instrumentação e medida da UBI e uma breve consulta nas respetivas datasheets. Após a conclusão destas duas breves etapas, procedeu-se a seleção do equipamento mais

adequado ao circuito, em função da finalidade do mesmo. Na tabela 4 são apresentados todos os componentes utilizados no circuito do sensor.

Tabela 4 - Componentes eletrônicos utilizados no circuito

Nome	Quantidade	Modelo
Bateria	1	Alcalina 9V
Resistência	1	100Ω
Resistência	1	100kΩ
Transistor	1	BC547B
Condensador	1	Duas placas de cobre

Bateria

A bateria/fonte de tensão tem como função alimentar o circuito, fornecendo a energia necessária para o funcionamento do mesmo.

Resistências

As resistências são componentes de circuitos que restringem a passagem da corrente.

Transistor

O transistor é um componente que amplifica pequenas mudanças no sinal recebido. Este possui 3 conexões: a base, o coletor e o emissor. O ganho ocorre quando a junção coletor-base é polarizada reversamente e a junção base-emissor é polarizada diretamente. A corrente de saída será tão elevada quanto for a corrente de base. Deste modo, quando é aplicada uma pequena tensão na base do transistor, a resistência entre o emissor e o coletor diminui, permitindo a passagem de corrente (Wartchow & Fröhlich, 2013). A Figura 21, apresenta o transistor utilizado bem como o seu símbolo em circuito

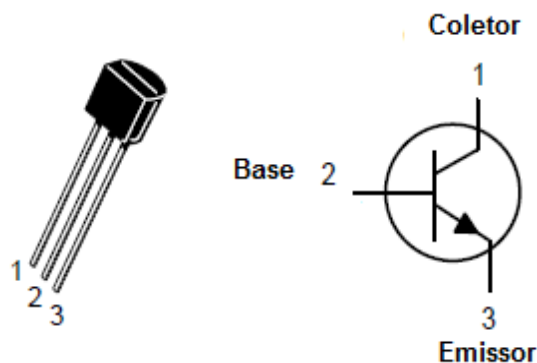


Figura 21 - Esquema do transistor utilizado e respetivo simbolo em circuitos (Motorola, 1996)

3.3.1.3. Software Multisim

Com o intuito de efetuar a simulação do circuito do sensor recorreu-se ao software *Multisim* da National Instruments. O *Multisim* é um programa de simulação e projeto de circuitos eletrónicos. Através deste software, é possível criar os circuitos e avaliar o comportamento do mesmo através da sua simulação. Deste modo, devido a esta funcionalidade, torna-se uma ferramenta extremamente útil, pois permite obter um maior conhecimento sobre o comportamento do circuito antes da prototipagem física do mesmo.

O *Multisim* inclui ainda a capacidade de simulação de microcontroladores, bem como a importação e exportação de circuitos para layout de placas de circuito impresso (*Print Circuit Board - PCB*). A ferramenta *Ultiboard PCB layout* deste software permite prototipar um PCB a partir do circuito desenvolvido. Deste modo recorrendo a esta ferramenta, é possível colocar todos os componentes numa placa de circuito impresso e efetuar a disposição e encaminhamento (*routing*) das ligações da maneira que o utilizador deseje (National Instruments, 2010). A Figura 22 apresenta a interface do software *Multisim*.

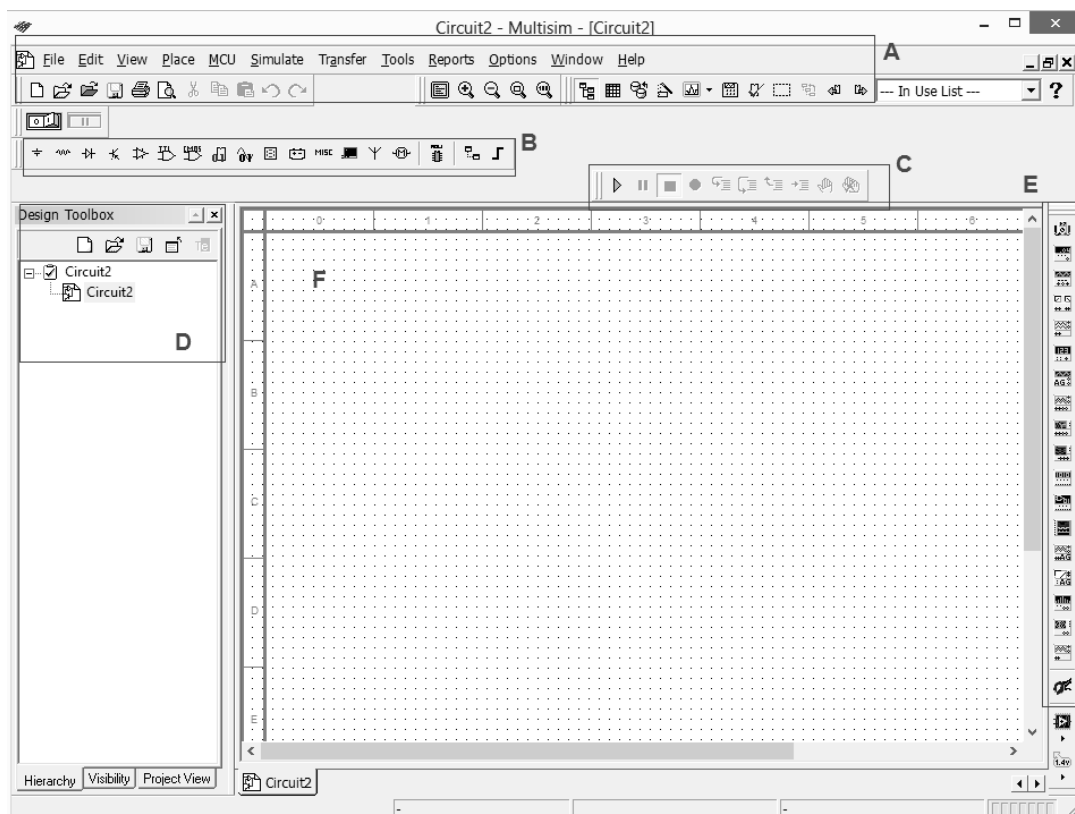


Figura 22 - Interface do software *Multisim*.

Observando a Figura 22 é possível visualizar os diversos menus e opções que o software dispõe. Representado pela letra A encontram-se os menus globais do software. Através da barra superior é possível aceder a todas as opções do programa. A barra inferior

representada pela letra A, apresenta alguns ícones que funcionam como atalhos do programa, não levando a necessidade de recorrer ao menu geral. A letra B e E representam mais menus, mas desta feita direcionados para os componentes disponíveis. Através da barra B é possível aplicar diretamente alguns componentes sem ter que recorrer à biblioteca geral. Por sua vez, o menu E apresenta a mesma função que o menu B mas com a diferença de este apenas apresentar componentes de medição /monitorização. O menu C corresponde à interface de simulação enquanto o menu D exhibe os projetos abertos no software. Por fim, a letra F representa o layout de trabalho do programa. É nesta zona que são colocados os componentes desejados e construídos os circuitos.

3.3.1.4. Simulação do circuito do sensor

Selecionados os componentes a utilizar, e sabendo a capacidade elétrica do condensador, foi possível efetuar uma simulação do circuito recorrendo ao software *Multisim*, de modo a determinar se os componentes utilizados no circuito eram os mais adequados. A Figura 23 apresenta o circuito utilizado bem como os componentes neste utilizado.

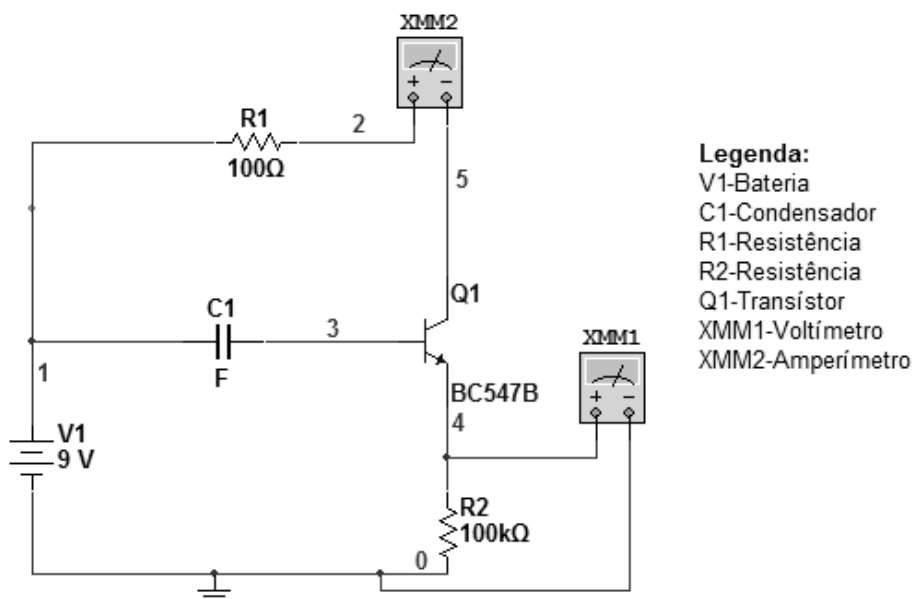


Figura 23 - Circuito utilizado para a medição da humidade relativa do ar.

O componente responsável pela deteção de humidade do ar no circuito é o condensador C1, construído com as duas placas de cobre. Como mencionado anteriormente, estas foram colocadas a uma distância de 0,5mm uma da outra, permitindo que o ar no interior do expositor passe através das mesmas. Conforme ocorra uma alteração da humidade do ar, a tensão que atravessa o condensador sofre também uma alteração, produzindo uma leitura no multímetro XMM1. Como a capacidade elétrica do condensador é baixa, foi necessário

aplicar um transistor amplificador ao circuito (*BC547B*) de modo a aumentar o sinal obtido. Por último, a resistência *R1*, encontra-se no circuito com o único propósito de proteger o transistor.

Contudo, para efeitos de dimensionamento foi considerado que a ligação entre a bateria e a base do transistor era direta, de modo a observar os valores obtidos, verificando se a resistência *R1* permitia proteger o transistor aquando da passagem do valor de corrente mais elevado. A Figura 24 apresenta o circuito utilizado na simulação bem como os seus componentes, para a situação mencionada anteriormente.

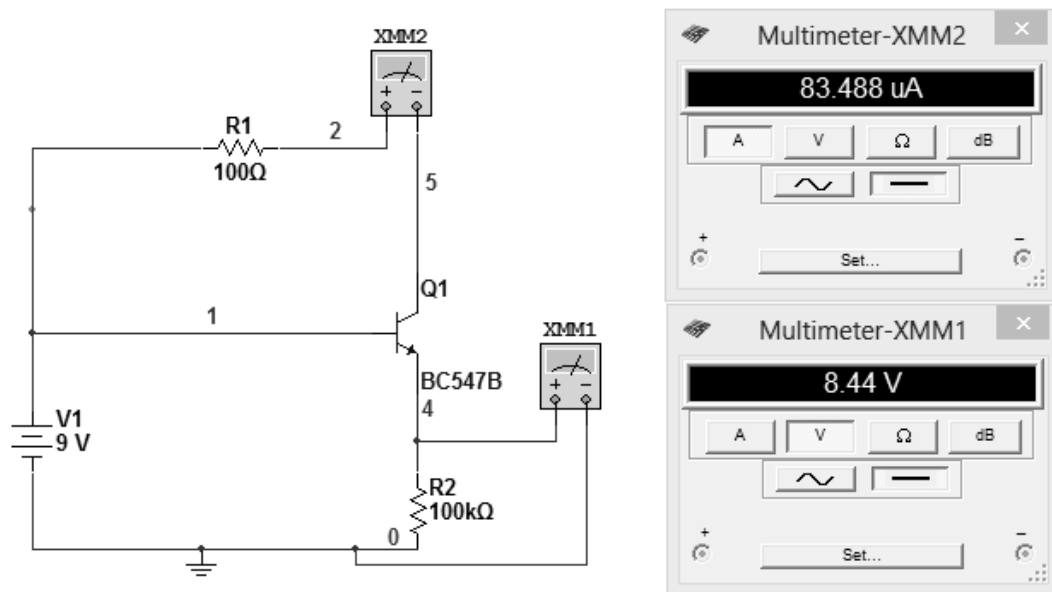


Figura 24 - Circuito utilizado na simulação no software *Multisim*.

O amperímetro *XMM2* foi colocado no circuito durante a simulação, de modo a medir a corrente de entrada no coletor do transistor, permitindo verificar se a mesma se encontrava nos limites estipulados no *datasheet* do componente (100mA DC) (Motorola, 1996). Deste modo, foi possível verificar que a resistência *R1* cumpre com o seu objetivo, e o valor da mesma é adequado para o circuito.

Para o outro caso extremo (0% humidade relativa do ar), foi também efetuada uma simulação de modo a verificar se os multímetros conseguiam obter algum valor nas suas medições. A Figura 25 apresenta os valores obtidos durante a simulação para 0% de humidade relativa do ar.

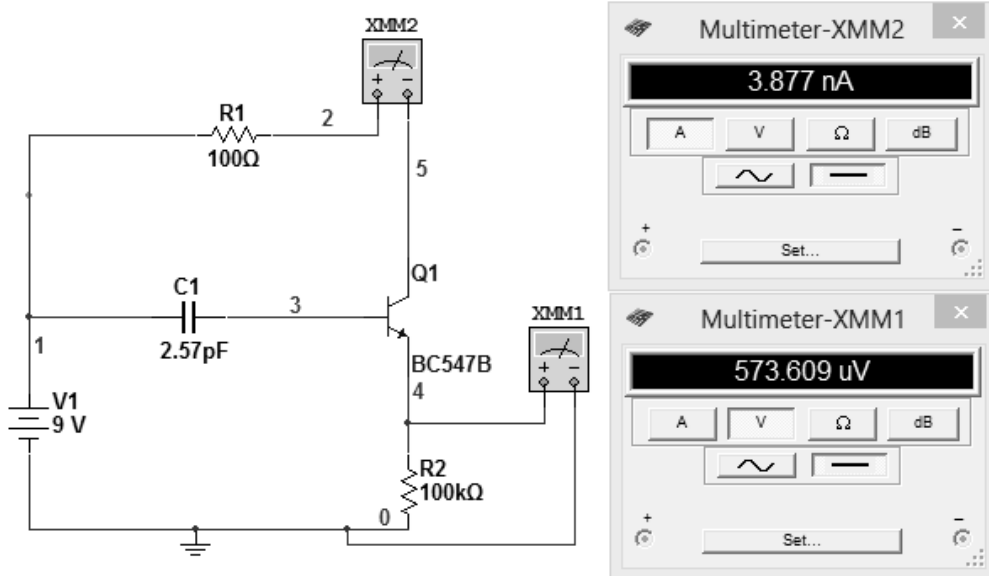


Figura 25 - Circuito utilizado na simulação no software *Multisim* para o caso extremo de 0% de HR.

Como é possível verificar na Figura 25, os multímetros obtiveram valores muito baixos durante a simulação a 0% de HR. Esta situação ocorre devido a baixa condutividade do ar quando este não contém humidade. No entanto, é necessário referir que o sensor não tem como objetivo medir gamas de humidade tão baixas, portanto esta simulação serviu apenas para observar o segundo caso extremo e verificar quais os valores obtidos.

3.3.2. Montagem e validação do sensor

A etapa posterior à simulação do circuito do sensor passou pela sua construção, para posteriormente ser efetuada a calibração do sensor. Para tal, foi necessário recorrer a uma bancada de ensaios, de modo a se conseguir um meio propício para a realização do ensaio nas melhores condições. A Figura 26 exhibe duas fotografias do sensor de humidade do ar desenvolvido.

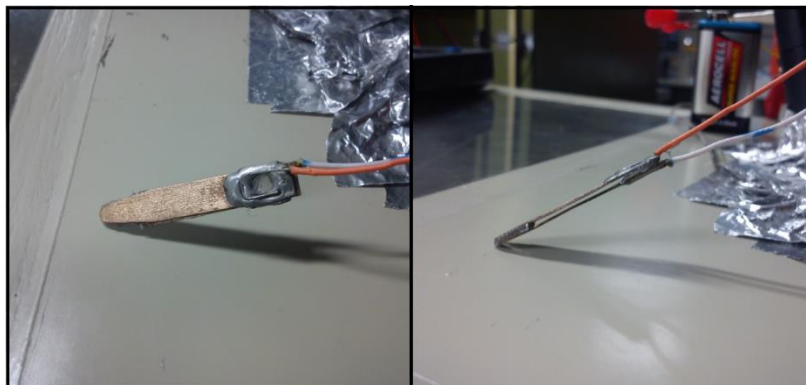


Figura 26 - Fotografias do sensor de humidade de baixo custo desenvolvido.

Os componentes eletrónicos mencionados no subcapítulo 3.3.1.2. foram colocados numa *breadboard*, de modo a facilitar o processo de montagem e o contacto entre o material. A Figura 27 apresenta o esquema de montagem dos componentes.

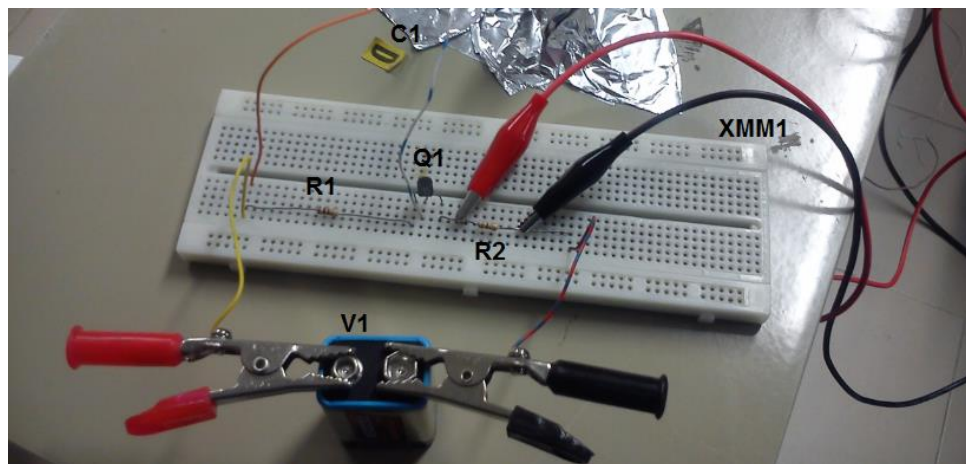


Figura 27 - Esquema de montagem do circuito do sensor

Após a construção do circuito, foi efetuada a sua calibração. Para tal, foi necessário recorrer à bancada de ensaios. A bancada de ensaios é essencialmente constituída por um Ar condicionado, pelo equipamento de aquisição de dados (sensor de referência) e por um equipamento de controlo de temperatura.

O material utilizado na calibração do circuito é apresentado na tabela 5 e descrito em seguida.

Tabela 5 - Material utilizado na calibração do sensor.

Material	Quantidade	Modelo
Circuito do sensor	1	-
Ar condicionado	1	P.A. Hilton Ar condicionado Unit A573
Sensor de humidade e temperatura	1	Rotronic Hygrolog NT3 com central de ligação DS-U2
Cronómetro	1	-
Multímetro	1	Fluke 177
Equipamento de controlo de temperatura	1	Cole Parmer Digi Sense

Sensor de humidade e temperatura

O objetivo do presente ensaio, foi a calibração do sensor de humidade construído. Deste modo, foi necessário recorrer a um equipamento para a medição da humidade e temperatura do sistema com a finalidade de servir como valor de referência. Assim, e recorrendo ao equipamento disponível no laboratório, foi utilizado o equipamento de medição da humidade relativa / temperatura Rotronic, apresentado na Figura 28.



Figura 28 - Data logger NT3.

Este equipamento, é constituído pelo Data Logger NT3 equipado com uma central de ligação DS-US. As características técnicas deste equipamento são seguidamente apresentadas:

- 3 Entradas de sonda (1 interna e 2 externas);
- Faixa de medição (sonda interna): entre 0 a 100% HR e -10 a 60°C;
- Faixa de medição externa: entre 0 a 100% HR e -100 a 200°C (dependendo da sonda externa aplicada);
- Display LCD.

O sensor externo aplicado ao Data Logger NT3 foi o sensor Hygroclip S (Figura 29). Este sensor de temperatura/humidade relativa foi instalado no interior do Ar condicionado P.A. Hilton.



Figura 29 - Sensor de temperatura/humidade hygroclip S.

As características técnicas deste equipamento são:

- Faixa de medição de humidade relativa: entre 0 a 100%;
- Faixa de medição de temperatura: entre -40 a 85°C;
- Precisão a 23°C: Humidade Relativa $\pm 1,5\%$;
- Precisão a 23°C: Temperatura $\pm 0,3^\circ\text{C}$;
- Material: Policarbonato - antracite RAL 7016.

Equipamento de controlo de temperatura

Para realizar um controlo da temperatura mais preciso no interior do AC, foi necessário recorrer a um controlador de temperatura. O controlador de temperatura utilizado foi o Cole Parmer Digi Sense R/S (Figura 30). Através da interação com o mesmo é possível controlar algumas resistências do AC P.A.Hilton permitindo aumentar ou diminuir a temperatura no interior.



Figura 30 - Cole Parmer Digi Sense R/S

Seguidamente são apresentadas algumas características técnicas deste equipamento:

- Resolução: 0,1°C com ajuste automático para temperaturas acima de 999,9°C;
- Precisão: ±1°C;
- Faixa de medição: entre 0 a 1768°C.
- Condição ambiente de operação: entre 0 a 40°C e 10 a 90% de humidade relativa.

Ar condicionado P.A. Hilton A573

O ar condicionado foi utilizado como bancada de ensaios, visto possibilitar variar o valor de humidade relativa do ar ao longo do ensaio. Algumas das características técnicas deste equipamento são:

- Caudal de ar: 0,13m³/s (máx);
- Pré-aquecimento (ar): Elementos de aquecimento elétrico 2x1kW;
- Reaquecimento (ar): Elementos de aquecimento elétrico 2x0,5kW;
- Ventilador: Centrifugo (velocidade variável);
- Aquecedores (água): 1x1kW e 2x2kW;
- Velocidade do compressor: 2700 a 3000rpm;
- Cilindrada do compressor: 25,95cm³ por rotação.

A Figura 31 permite observar mais pormenorizadamente o ar condicionado através do seu esquema de funcionamento.

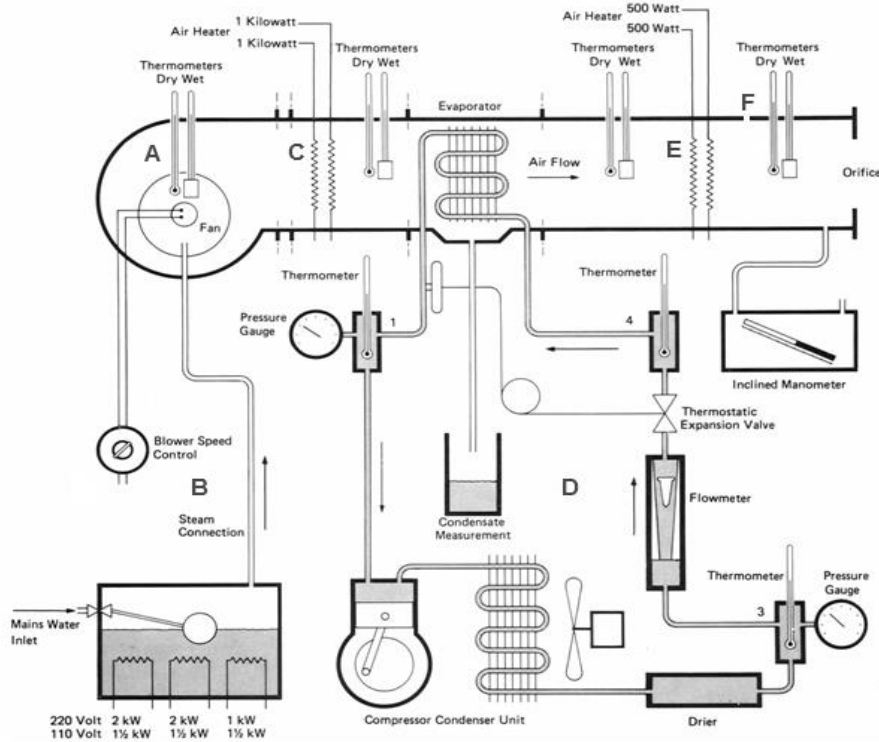


Figura 31 - Esquema de funcionamento do AC utilizado durante a calibração do sensor.

O ar condicionado permite humidificar e desumidificar o ar ambiente de ensaio, o que vai de encontro ao pretendido. O ventilador centrífugo (A) movimenta o ar no interior do ar condicionado e admite ar exterior para o interior do ar condicionado através do movimento de sucção. O humidificador (B) permite aumentar o nível de humidade no interior do AC, através do auxílio de 3 resistências, que têm como função aquecer um recipiente de água, adicionando vapor de água ao sistema e consequentemente aumentando a humidade relativa do ar. As resistências (C) permitem aumentar a temperatura do ar ambiente do sistema. Por sua vez, o sistema de refrigeração (D) contribui para o arrefecimento do sistema e através do evaporador permite também desumidificar o ar ambiente. As resistências (E) servem para reaquecer o ar do sistema, caso o operador assim o deseje. O sensor de humidade do ar construído e o sensor de humidade/temperatura de referência utilizado foram colocados num orifício próprio do AC localizado em F. Assim, qualquer alteração a nível da humidade e temperatura do ar do sistema era monitorizado neste ponto. A Figura 32 apresenta o AC utilizado na calibração do sensor.



Figura 32 - P.A Hilton AR condicionado Unit A573.

Através da Figura 32 é possível visualizar o Ar condicionado no seu todo, bem como o equipamento de controlo de temperatura utilizado e o circuito. Este último foi colocado junto ao AC de modo a ser possível introduzir o sensor numa cavidade do ar condicionado juntamente com o sensor de humidade e temperatura de referência.

A Figura 33 mostra o posicionamento do circuito do sensor, bem como o local onde o sensor testado e o sensor de referência foram introduzidos no AC.

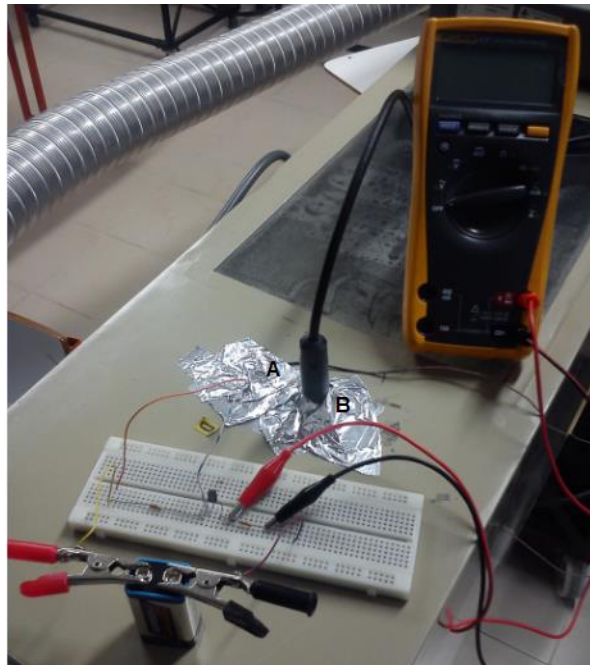


Figura 33 - Circuito do sensor durante a calibração. A- Orifício onde foi colocado o sensor de humidade desenvolvido. B- Orifício onde foi colocado o sensor de referência.

3.3.2.1. Procedimento experimental

1. Colocou-se o AC em funcionamento, bem como os demais componentes mencionados anteriormente;
2. Através da interação com o equipamento de controlo de temperatura e da interação com a interface do AC foi colocado o sistema com 30% de humidade relativa do ar interior (mensurado pelo sensor de referência);
3. Devido à instabilidade do ar ambiente interior do ar condicionado, aguardou-se 10 minutos para obtenção de regime permanente;
4. Após a estabilização do sistema, foram retirados 10 valores em 10 minutos (1 a cada minuto) mensurados pelo multímetro e pelo sensor de referência;
5. Procedeu-se à adição de cerca de 7% de humidade relativa ao sistema, através da interação com o AC e com o equipamento de controlo de temperatura;
6. Aguardou-se novamente 10 minutos pela estabilização do sistema e foi anotado o valor mensurado pelo multímetro;
7. Repetiram-se os passos 3 a 5 até atingir uma humidade relativa do ar em torno dos 70%.

3.3.3. Análise e discussão de resultados

Durante a variação de humidade do ar, foi necessário aguardar pelo regime permanente, pois o sistema apresentava ligeiras variações de temperatura e humidade do ar ao longo do tempo. Deste modo, a cada ponto, era necessário deixar o sistema estabilizar e posteriormente adquirir 10 valores em 10 minutos (1 valor a cada minuto) com o intuito de calcular a sua média. Por fim, a calibração foi finalizada em torno dos 70%. Os valores obtidos da calibração do sensor são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Valores médios obtidos durante a calibração do sensor

Calibração do sensor			
Ensaio	HR (%)	Valores médios	
		Tensão (mV)	Tensão (V)
1	27,58	0,13	0,0001
2	34,775	1	0,0010
3	41,254	9,95	0,0100
4	48,517	221,025	0,2210
5	53,799	528,31	0,5283
6	59,604	1139	1,1390
7	67,328	2260,5	2,2605
8	73,789	3138,5	3,1385

Com os pontos obtidos, e recorrendo ao *software MATLAB*, foram colocados os pontos médios obtidos num gráfico onde foram traçadas diversas curvas de tendência através da ferramenta *cftool*. Após a seleção da curva de tendência mais adequada, foi traçado o intervalo de confiança de 95%, de modo a verificar se todos os pontos se encontravam nesta faixa. Esta última etapa foi realizada com o intuito de fornecer mais credibilidade à curva de tendência obtida. A curva de calibração obtida com os respetivos limites impostos pelo intervalo de confiança selecionado é exibida na Figura 34.

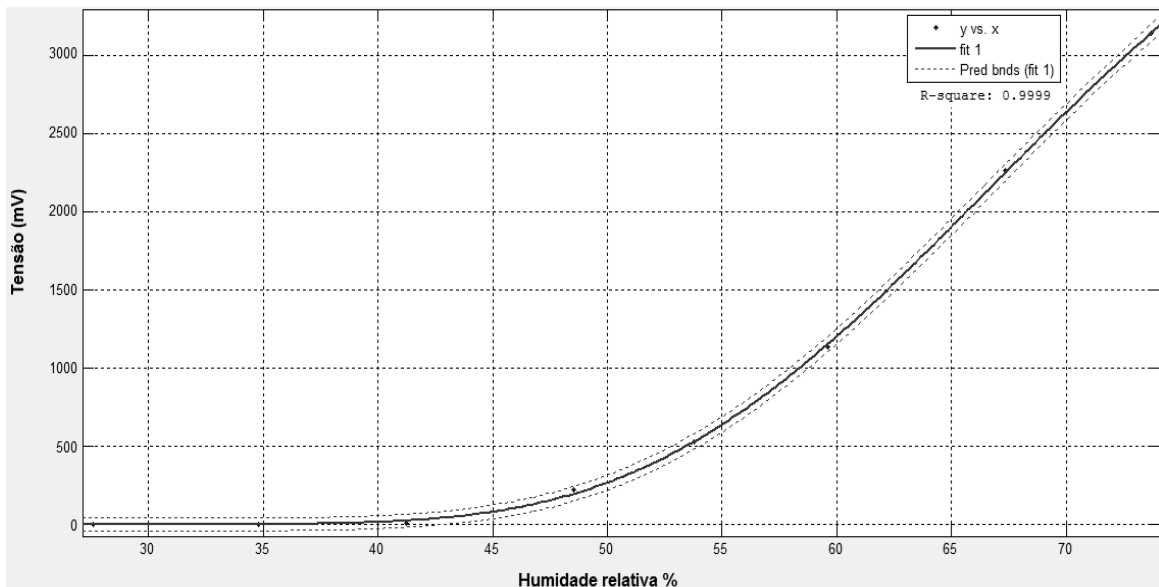


Figura 34 - Curva de calibração obtida com os respetivos limites do intervalo de confiança a 95%.

Através da Figura 34 é possível observar que os pontos médios obtidos, encontram-se todos no interior dos limites estipulados pelo intervalo de confiança de 95%, permitindo oferecer mais credibilidade à curva de calibração obtida. A equação da curva de calibração obtida é dada por:

$$y = \exp \left[a + \frac{b}{x} + c \times \ln(x) \right] \quad [16]$$

Em que os coeficientes da Equação 16 são:

$$a = 75,06$$

$$b = -1111$$

$$c = -12,08$$

A equação da curva de calibração obtida foi resolvida em função da humidade relativa do ar, com a finalidade de se observar a curva de operação do sensor. A gama de humidade relativa selecionada encontra-se entre 25% e 75% e resultou na curva de operação apresentada na Figura 35.

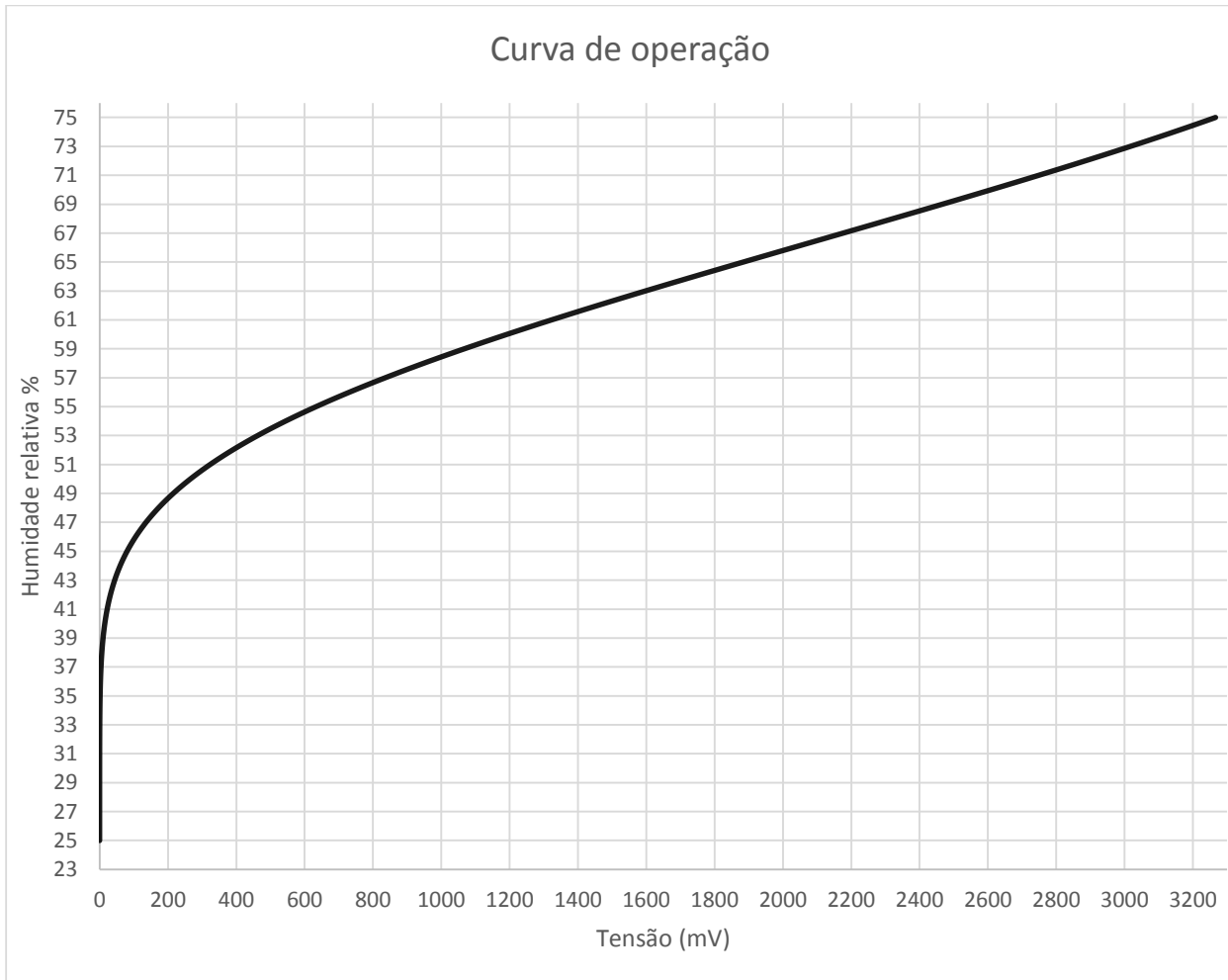


Figura 35 - Curva de operação do sensor de humidade relativa do ar desenvolvido.

Observando a curva de operação obtida para o sensor de humidade do ar desenvolvido, é possível verificar que para humidade relativa do ar inferior a 43% (aproximadamente), o valor de tensão obtido é baixo (> 15 a 20mV). Assim e devido ao facto da escala utilizada na curva de operação ser bastante elevada para os valores de tensão relativos a índices de humidade relativa do ar mais baixos, foi traçada a curva de operação (Figura 36), através dos mesmos valores apresentados anteriormente, mas desta feita, apenas para humidade relativa do ar abaixo dos 47%, permitindo assim ao leitor, obter uma perceção mais correta do comportamento do sistema nesta gama.

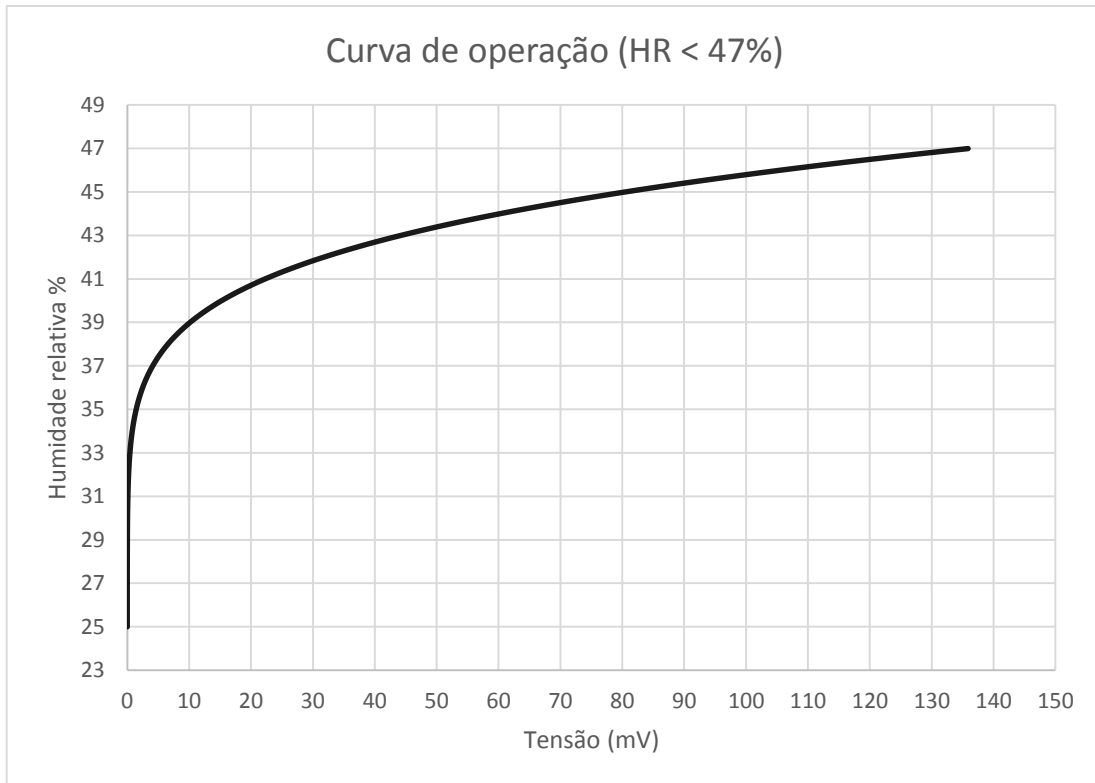


Figura 36 - Curva de operação do sensor de humidade relativa do ar para valores inferiores a 47% HR.

Deste modo, através da análise da Figura 36 é possível obter uma análise mais correta do comportamento do sensor, para ambientes com humidades mais baixas. Apesar da diminuição da escala, e do refinamento da curva para valores mais baixos, os valores de humidade relativa do ar inferiores a 35% apresentam de facto, valores de tensão muito baixos, na ordem de 0 a 2mV. Esta situação deve-se à baixa capacidade do sensor para ambientes com humidades relativas do ar baixas. Assim, em gamas mais baixas o sensor pode apresentar alguma dificuldade em detetar a mesma.

Analisando novamente a Figura 35, mas desta feita para humidades relativas do ar mais elevadas (acima de 43%), é visível que o sensor vai sofrendo cada vez mais, um elevado ganho de sinal (tensão) com o aumento do valor de humidade relativa do ar interior. Esta situação leva a que as medições efetuadas a partir desta gama de humidade do ar sejam mais inconstantes e sujeitas a variações mais repentinas. Contudo, apesar deste pormenor, o sensor permite cumprir com o pretendido inicialmente, pois as variações obtidas para gamas mais elevadas não vão de todo interferir com o objetivo proposto, visto que a gamas de humidade mais elevadas o sensor estará sempre ativo.

3.4. Nota conclusiva

No capítulo que agora termina fez-se a apresentação do sensor de humidade desenvolvido. Foi abordado o desenvolvimento, construção e respetiva calibração do sensor de humidade desenvolvido. Inicialmente, foi efetuado o projeto do sensor e respetivo circuito. Numa fase posterior, realizou-se a simulação do circuito fazendo uso do software *Multisim*, com o intuito de observar o comportamento do circuito para os dois casos extremos de humidade relativa, a que este poderia hipoteticamente ser sujeito.

Após a confirmação do correto funcionamento do circuito através da simulação, procedeu-se à sua construção com a finalidade de se realizar a sua calibração. Recorrendo a uma bancada de ensaios, foi realizado o devido estudo experimental, onde foi anotado o comportamento do sensor para vários valores de humidade relativa. Após o tratamento dos dados obtidos, foi traçada a curva de operação do sensor de humidade desenvolvido, viabilizando assim a sua utilização.

Os resultados provenientes do ensaio experimental, demonstram que o sensor desenvolvido consegue operar em gamas de humidade relativa acima de 25% (aproximadamente), permitindo assim, a sua utilização para a sensorização da humidade relativa do ar interior de um expositor fechado.

4. Protótipo experimental

4.1. Introdução

Ao longo do presente capítulo, é apresentado o dimensionamento e construção do protótipo experimental, bem como os resultados obtidos ao longo de todo o processo, quer a nível numérico, quer posteriormente a nível experimental.

O capítulo inicia-se com o dimensionamento e construção do modelo do expositor, sendo exibidas as etapas de todo o processo, quer a nível de dimensionamento, quer de construção. O capítulo segue depois com a apresentação do circuito de controlo aplicado ao sensor desenvolvido. O circuito desenvolvido tem como objetivo permitir a aplicação do sensor de humidade do ar no controlo de um sistema de anti-embaciamento, com o intuito de evitar o embaciamento das superfícies envidraçadas, operando apenas quando necessário de modo a reduzir o consumo energético deste sistema e simultaneamente a carga térmica transferida para o ar interior do expositor.

Com a construção quer do modelo do expositor, quer do circuito de controlo, pretendeu-se conjugar ambos num determinado ambiente, de modo a criar um ambiente o mais próximo quanto possível da situação real a que estão sujeitos os expositores nas lojas de comércio alimentar. Pretende-se com estes ensaios, testar o comportamento do circuito com a variação da humidade relativa do ar interior.

4.2. Expositor desenvolvido

Após a calibração do sensor, é agora necessário conjugar o mesmo com um circuito capaz de controlar o funcionamento do sistema anti-embaciamento, através dos dados mensurados pelo sensor. Contudo, a primeira fase deste processo parte do dimensionamento do sistema anti-embaciamento e para tal é necessário saber as dimensões da superfície vidrada do expositor.

Devido a inexistência de um expositor no laboratório de termodinâmica aplicada e transmissão de calor do DEM/UBI, foi necessário proceder ao dimensionamento e posterior construção de um protótipo do expositor, de modo a poder conjugar o mesmo com o circuito de controlo, permitindo numa fase posterior, efetuar o ensaio experimental.

4.2.1. Dimensionamento

Inicialmente, pretendia-se criar um ambiente interior o mais idêntico possível ao ambiente ao qual estão sujeitos os expositores refrigerados, durante o seu funcionamento em lojas de comércio alimentar. No entanto, esta ideia foi impossível de passar a prática, pois a

criação de um modelo ideal para essas condições teria de comportar um sistema de refrigeração, ser o mais hermética possível, o que levaria inevitavelmente a mais custos do projeto. Deste modo e devido às restrições orçamentais, o modelo desenvolvido foi aplicado ao ar condicionado utilizado na calibração do sensor de humidade de ar, como uma extensão do mesmo.

Esta opção faz com que seja possível controlar o índice de humidade relativa do ar no interior do modelo desenvolvido, permitindo observar o comportamento do sensor de humidade relativa do ar, bem como do circuito a ser desenvolvido, em ambientes com diferentes índices de humidade relativa do ar interior.

No dimensionamento do expositor foram considerados alguns pormenores:

- O modelo desenvolvido será aplicado como uma extensão do ar condicionado utilizado na calibração do sensor. Portanto, as suas dimensões devem ser tais que permitam um acoplamento;
- Será aplicada uma porta vidrada ao expositor, com o objetivo de deixar o sistema mais realista permitindo a aplicação do sistema anti-embaciamento em torno do vidro;
- O modelo será construído em acrílico de modo a possibilitar uma melhor visualização do seu ambiente interior;
- Será necessário efetuar dois furos no topo do modelo de modo a permitir a passagem do fio correspondente ao sistema anti-embaciamento.

Foram retiradas as devidas medidas ao ar condicionado P.A Hilton Unit A573 e recorrendo ao *software SolidWorks* foi projetado o devido desenho técnico do modelo. A Figura 37 apresenta um esboço do desenho efetuado em SolidWorks.

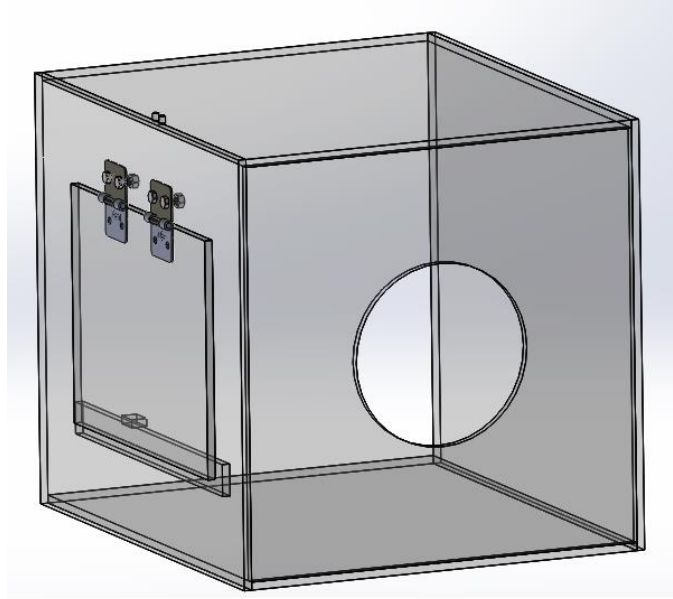


Figura 37 - Desenho do modelo do expositor, efetuado em software SolidWorks.

O modelo é quase todo ele constituído por acrílico, a exceção das dobradiças, parafusos e respetivas porcas, bem como o vidro da porta. De modo a simplificar o modelo e a torná-lo mais prático e barato, foi também aplicado um pequeno batente em acrílico para que a porta não ultrapasse o limite definido por este, e uma pequena pega também em acrílico. O desenho técnico com todas as devidas informações do modelo encontra-se em anexo da presente dissertação.

4.2.2. Construção do expositor

Como foi decidido que o expositor seria construído quase na sua totalidade em acrílico, foi necessário obter algumas placas deste equipamento, de modo a que fosse possível construir o modelo dimensionado. Contudo, e apesar do modelo não entrar propriamente no âmbito da parte eletrónica do projeto, também aqui foi considerado o fator de baixo custo, levando a que desta maneira fosse adquirido o material necessário, pelo preço mais baixo possível.

A construção do expositor foi efetuada de modo artesanal, pelo que ao não ter sido sujeito a cortes de precisão, levou a que o resultado final tivesse apresentado algumas imperfeições, nomeadamente no encaixe entre a superfície vidrada e o acrílico. Apesar desta contrariedade, as restantes superfícies não apresentaram esse tipo de problemas e permitiram seguir de acordo com o projetado.

As superfícies em acrílico foram unidas através de uma cola de cianoacrilato e devidamente isoladas por silicone através da sua aplicação no interior do modelo.

A Figura 38 exibe uma fotografia do expositor após a sua construção.



Figura 38 - Fotografia do expositor construído.

Apesar de alguma pequena folga que possa existir entre o vidro e o acrílico, o modelo serve apenas o propósito de testar o circuito de forma mais real, não ocorrendo nenhuma abertura da porta durante o ensaio. Deste modo, a pequena folga existente será isolada devidamente aquando do ensaio de modo a manter um ambiente o mais hermeticamente possível.

O desenvolvimento e respetiva construção do modelo resultou na possibilidade de dimensionar o circuito de controlo do sistema anti-embaciamento.

4.3. Circuito de controlo

Após a construção do modelo, é agora possível dimensionar o restante circuito eletrónico de controlo do sistema anti-embaciamento. Como já foi mencionado, o presente circuito de controlo será acoplado ao respetivo circuito do sensor de humidade do ar, com a finalidade de controlar o funcionamento do sistema anti-embaciamento. O fator de baixo custo leva a que o circuito desenvolvido, seja composto pela menor quantidade de componentes possível, organizados de forma prática e simples.

4.3.1. Desenvolvimento do circuito de controlo

O sensor de humidade do ar desenvolvido permite monitorizar o índice de humidade relativa do ar no interior do expositor. Mas este dispositivo por si só, não permite controlar o comportamento do sistema de anti-embaciamento que será aplicado no expositor. Esta situação levou à necessidade de desenvolver um circuito que através dos dados obtidos pelo sensor de humidade do ar, permita controlar o sistema de anti-embaciamento.

Foi referido anteriormente que o circuito com o respetivo sistema de anti-embaciamento, será acoplado ao modelo do expositor desenvolvido. No entanto, antes de qualquer desenvolvimento, é necessário determinar a potência do sistema de anti-embaciamento a utilizar. Esta potência depende do tamanho da superfície vidrada.

4.3.1.1. Cálculo da potência do sistema de anti-embaciamento

Devido ao fator simplicidade e custo, o sistema de anti-embaciamento deve ser alimentado diretamente da rede elétrica, evitando a adição de um transformador ao equipamento. Dada esta condição de projeto, é necessário determinar a potência do sistema de modo a determinar o valor da corrente elétrica que deve percorrer, bem como a resistência do fio a utilizar. De acordo com a SPX (2012), a potência dos sistemas de anti-embaciamento pode ser determinada recorrendo à Equação 17:

$$P = U \times A \times \Delta T \quad [17]$$

Em que:

- P - Potência do sistema, W;
- U - Coeficiente global de transferência de calor, $W/m^2\text{°C}$;
- A - Área das superfícies; m^2 ;
- ΔT - Diferença entre a temperatura exterior e a temperatura interior da superfície vidrada necessária para que não ocorra condensação aquando da abertura da porta.

Deste modo, como é conhecido o valor de todas as variáveis necessárias, é possível efetuar o cálculo da potência do sistema de anti-embaciamento a aplicar no expositor.

Área da superfície:

Para determinar a área da superfície vidrada, é necessário recorrer ao desenho técnico do modelo construído. A área da superfície vidrada do modelo construído é:

$$A = 15\text{cm} \times 20\text{cm} \leftrightarrow A = 300\text{cm}^2 \leftrightarrow A = 0,03\text{m}^2.$$

Coeficiente global de transferência de calor:

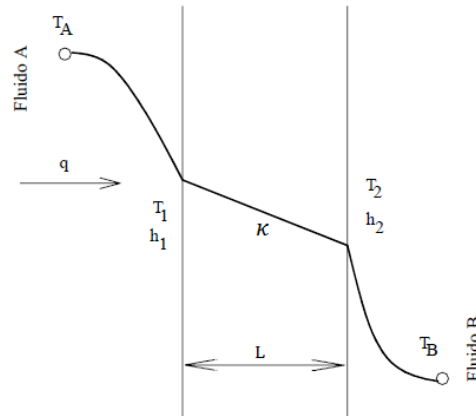


Figura 39 - Transferência entre dois fluidos separados por uma superfície.

O coeficiente global de transferência de calor é dado pelo inverso da soma das resistências térmicas tal como exposto na Equação 18 e desprezando a radiação térmica:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{L}{\kappa} + \frac{1}{h_2} \quad [18]$$

Em que:

- h_1 - Coeficiente convectivo de transferência de calor do meio 1, $W/(m^2 \cdot K)$;
- h_2 - Coeficiente convectivo de transferência de calor do meio 2, $W/(m^2 \cdot K)$;
- κ - Condutividade térmica, $W/(m \cdot ^\circ C)$;
- L - Espessura do material, m.

Dados:

- Como o fluido A é o mesmo que o fluido B (ar), o coeficiente convectivo de transferência de calor assume o mesmo valor $h_1 = h_2 = 5 - 25$ ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$) (*The engeneering toolbox*, 2014). Será considerado o caso mais desfavorável para o dimensionamento: $h = 25$ ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$);
- $L = 5\text{mm} = 0,005\text{m}$;
- κ (vidro simples) = $0,8$ ($W/m \cdot ^\circ C$) (*Young et al.*, 2011).

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{25} + \frac{0,005}{0,8} + \frac{1}{25} \leftrightarrow \frac{1}{U} = 0,4006 \leftrightarrow U = 11,594 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Diferença de temperatura:

Para determinar a diferença de temperatura é necessário recorrer a uma carta psicométrica. Considerando a temperatura do ar exterior de 25°C, uma humidade relativa do ar interior de 60% (classe de homologação 3 dos expositores - classe mais utilizada em Portugal) e uma temperatura do ar interior de 0°C, obtém-se um ponto de orvalho no interior do expositor de 16,7°C. Deste modo, para evitar que o ar exterior que se infiltra no expositor aquando da abertura da porta, condense ao entrar em contacto com a superfície vidrada, é necessário que a temperatura da mesma seja superior ao ponto de orvalho referido. Considerados todos estes parâmetros, a temperatura considerada para a superfície vidrada interior é de 17°C.

$$\Delta T = 25 - 17 \leftrightarrow \Delta T = 8^{\circ}\text{C}$$

Potência do sistema de anti-embaciamento

Após a obtenção de todos os parâmetros necessário, é possível determinar a potência do sistema de anti-embaciamento:

$$P = U \times A \times \Delta T \quad [17]$$

$$P = 11,594 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{°C}} \times 0,03\text{m}^2 \times 8^{\circ}\text{C} \leftrightarrow P = 2,783\text{W}$$

Após o cálculo da potência do sistema de anti-embaciamento é necessário determinar o fio a utilizar, bem como a sua resistência. O fio em questão irá funcionar como uma resistência, portanto este deve ter uma elevada resistividade.

Foi considerada uma tensão de 220V a aplicar ao sistema de anti-embaciamento. Este valor foi seleccionado devido ao simples facto de ser a tensão de rede existente e evita assim a aplicação de transformadores de modo a reduzir a tensão aplicada ao sistema de anti-embaciamento.

Em relação ao fio a utilizar, o fio de cromo-níquel é frequentemente utilizado em elementos de aquecimento, quer em aplicações domésticas, quer em industriais e apresenta também uma elevada resistividade. Estes fatores fazem deste um bom fio a utilizar no sistema de anti-embaciamento (Alloy Wire, 2014).

Recorrendo à Lei de Joule, é possível determinar a resistência necessária para o sistema de anti-embaciamento.

$$P = RI^2 \quad [19]$$

$$V = RI \leftrightarrow I = \frac{V}{R} \quad [20]$$

Onde:

- P - Potência do sistema, W;
- R - Resistência do fio, Ω ;
- I - Corrente elétrica, A;
- V - Tensão elétrica, V.

$$P = R \left(\frac{V}{R}\right)^2 \leftrightarrow P = \frac{V^2}{R} \quad [21]$$

Sabendo que:

- $P=2,783W$;
- $V=220V$.

$$2,783 = \frac{220}{R} \leftrightarrow R = \frac{220^2}{2,783} \leftrightarrow R = 17k\Omega$$

A resistência obtida é muito elevada. Esta situação deve-se ao facto da potência necessária ser bastante pequena, e a tensão elétrica aplicada elevada. Contudo, e apesar do resultado, será determinada a quantidade de fio necessária para obter esta resistência no sistema, bem como a corrente elétrica que o deve percorrer.

$$V = RI \leftrightarrow I = \frac{V}{R} \quad [20]$$

$$I = \frac{220}{17000} \leftrightarrow I = 0,0129A$$

A corrente obtida, apesar da tensão elevada (em proporção ao sistema) é pequena e adequada. Esta situação ocorre devido à elevada resistência necessária no sistema. Para se proceder a seleção do fio adequado ao circuito, é necessário recorrer à Tabela 7, que apresenta as características dos fios de cromo-níquel.

Tabela 7 - Tabela de fios e cabos padrão para fios de cromo-níquel (EDUFER, 2014).

Fios e cabos padrão (cromo-níquel)		
AWG	Secção nominal	Corrente máxima (A)
33	0,0254	0,387
34	0,0201	0,318
35	0,0154	0,268
36	0,0132	0,225
37	0,00951	0,193
38	0,00785	0,159
39	0,00636	0,134
40	0,00502	0,112

Visto que é necessário atingir um valor de resistência elevada (17kΩ), foi selecionado o fio AWG 40. Observando a tabela 7, é possível visualizar que o nível de corrente que deve percorrer o fio encontra-se dentro dos limites definidos para o fio em questão. Dado isto, será efetuado o cálculo para este.

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad [22]$$

Onde:

- R - Resistência do fio, Ω;
- ρ - Resistividade do fio a 20°C, Ω/m;
- L - Comprimento do fio, m;
- A - Área da secção do fio, m².

A resistividade do fio de cromo-níquel a 20°C é de $1,73 \times 10^{-6}$ Ω/m.

$$17000 = \frac{1,73 \times 10^{-6} \times L}{0,00502 \times 10^{-6} \text{m}^2} \leftrightarrow L \approx 49\text{m}$$

Após a realização dos cálculos é notório que o comprimento do fio é enorme em proporção ao vidro do expositor. Esta situação, como já foi mencionado ocorre devido ao facto da tensão aplicada ser de 220V e a dimensão do vidro ser extremamente pequena quando comparada com os expositores “reais” utilizados em lojas de comércio alimentar. O necessário para diminuir esta situação seria trabalhar com uma tensão menor, de modo a diminuir a resistência necessária no sistema e consequentemente o comprimento do fio.

A título de exemplo, e recorrendo novamente à Equação 17, será efetuado um cálculo para um expositor com dimensões mais idênticas aos expositores utilizados nas lojas de comércio alimentar.

Após a consulta de um catálogo de expositores, com a respetiva ficha técnica, foi considerado um expositor com uma porta envidraçada com as seguintes dimensões, 1400x500mm (Infrico, 2014). Assim, a potência do sistema de anti-embaciamento será de:

$$P = U \times A \times \Delta T \quad [17]$$

$$P = 11,594 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \times 0,7m^2 \times 8^\circ C \leftrightarrow P = 64,93W$$

Para um expositor refrigerado com as dimensões consideradas, a potência aumentou para cerca de 65W. Deste modo, recorrendo à Equação 21, a resistência necessária do fio a aplicar no sistema de anti-embaciamento seria de:

$$P = \frac{V^2}{R} \leftrightarrow R = \frac{220^2}{64,93} \leftrightarrow R = 745,42\Omega$$

Seguindo o procedimento do dimensionamento anteriormente utilizado e recorrendo novamente à Equação 20:

$$I = \frac{220}{745,42} \leftrightarrow I = 0,295A$$

Recorrendo novamente à tabela 7 e atendendo aos valores de corrente máxima permitida em cada fio apresentado, o fio com mais resistência que poderá ser aplicado nesta situação é o AWG 34. Deste modo, através da Equação 22:

$$R = \frac{\rho L}{A} \leftrightarrow 745,42 = \frac{1,73 \times 10^{-6} \times L}{0,0201 \times 10^{-6} m^2} \leftrightarrow L \approx 8m$$

Após a realização dos cálculos para um expositor semelhante aos utilizados nas lojas de comércio alimentar, é possível verificar que para estas dimensões, o comprimento do fio a utilizar rondaria os 8m, um valor adequado. Atendendo às dimensões consideradas para a superfície vidrada, seriam necessárias cerca de 3 voltas de fio de cromo-níquel AWG34 em torno da superfície.

4.3.1.2. Componentes eletrónicos

Para a realização da construção e posterior simulação do circuito em *software Multisim*, foi necessário determinar quais os componentes a utilizar de modo a cumprir a finalidade

do circuito de controlo. Para tal foi necessário observar os valores determinados no cálculo da potência do sistema de anti-embaciamento e verificar ainda, quais os componentes eletrónicos disponíveis no laboratório de instrumentação e medida do DEM/UBI. Na Tabela 8 são apresentados todos os componentes utilizados no circuito de controlo.

Tabela 8 - Componentes eletrónicos utilizados no circuito de controlo.

Material	Quantidade	Modelo
Resistência (R3)	1	-
Resistência (R4)	1	-
Resistência (R5)	1	1kΩ
Comparador	1	LM324D
Transístor	1	BC547B
Relé	1	EDR201A12
Díodo	1	1N4148
Fonte de alimentação	1	220V
Fio de cromo-níquel (R6)	1	AWG 40
Circuito do Sensor de humidade	1	-

Apesar do inconveniente em torno do comprimento do fio referido no cálculo da potência do sistema de anti-embaciamento, será considerado para a simulação do circuito, o fio de cromo níquel AWG 40, com a respetiva resistência dimensionada. O valor das resistências R3 e R4 será determinado mais adiante, aquando da verificação do comportamento do circuito em simulação.

De todos os materiais utilizados no circuito, apenas os componentes comparador, relé e díodo não foram utilizados anteriormente. Os restantes materiais tiveram uma breve explicação sobre o seu princípio de funcionamento no subcapítulo 3.2.1.2.

Comparador

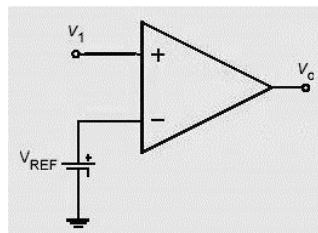


Figura 40 - Circuito comparador usando um AMPOP (ISCTE, 2014).

No comparador (Figura 40), o terminal v- do componente é ligado a um sinal de referência e o terminal v+ é ligado a uma fonte de sinal. Como acontece nos demais circuitos não realimentados, o comparador opera na zona não linear (saturação). Assim, para valores de

V_1 inferiores a 0V, a diferença de potencial ($v_+ - v_-$) à entrada do mesmo é negativa pelo que o dispositivo satura negativamente. Reciprocamente, para valores de V_1 superiores a 0V, a diferença de potencial à entrada ($v_+ - v_-$) é positiva e o dispositivo satura positivamente. Tipicamente este circuito é usado para comparar dois sinais (ou níveis de tensão) e gerar um sinal com a informação correspondente à ordem relativa dos valores de tensão dos sinais. Geralmente um dos níveis de tensão a comparar é uma tensão de referência, V_{ref} (ISCTE, 2014).

Relé

O relé apresenta um princípio de funcionamento simples. Quando uma corrente circula na bobina do mesmo, esta cria um campo magnético que atrai um ou uma série de contactos, permitindo abrir ou fechar circuitos.

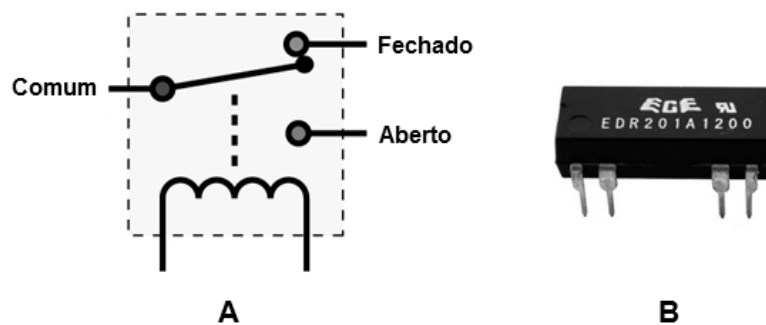


Figura 41 - A-princípio de funcionamento de um relé. B- Relé EDR201A12 utilizado.

Ao cessar a corrente da bobina, o campo magnético cessa também, fazendo com que os contactos regressem a posição original.

Díodo

O díodo é composto por dois blocos de material semicondutor, um do tipo N e outro do tipo P. A representação esquemática do mesmo é apresentada na Figura 42.

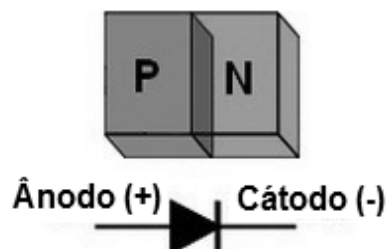


Figura 42 - Esquema de um díodo (Electrónica, 2014).

Este tipo de dispositivo permite a passagem de corrente com facilidade num sentido e oferece uma grande resistência à passagem da mesma no sentido contrário. Deste modo, quando o ânodo estiver a um potencial positivo em relação ao cátodo, o díodo conduz e a corrente terá o sentido indicado pela seta. Nestas condições, o díodo encontra-se diretamente polarizado. Quando o ânodo estiver a um potencial negativo em relação ao cátodo, o díodo não conduz e a corrente, que teria o sentido contrário ao da seta, não atravessa o mesmo. Nesta ultima situação, diz-se que o díodo se encontra inversamente polarizado (Electrónica, 2014).

4.3.1.3. Circuito de controlo

Selecionados os componentes a utilizar, e sabendo a potência a fornecer ao sistema de anti-embaciamento, foi possível criar um esboço do circuito final recorrendo ao software *Multisim*. A Figura 43 apresenta o circuito utilizado bem como os seus componentes.

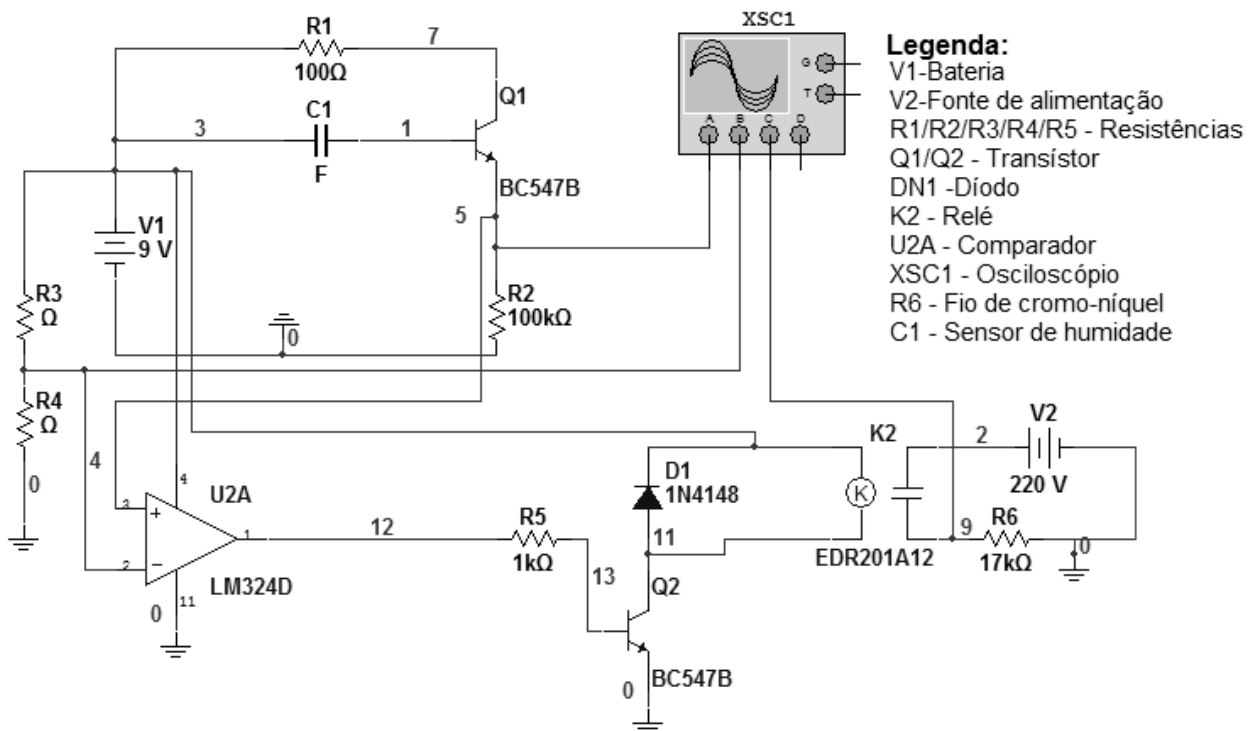


Figura 43 - Esquema do circuito de controlo.

Através da adição de novos componentes, é agora possível controlar o sistema de anti-embaciamento de modo a que este funcione apenas para valores superiores ao índice de humidade do ar desejado no interior do expositor. A bateria de 9V fornece energia para o circuito do sensor, para o comparador e alimenta ainda o relé. Esta solução foi utilizada de modo a manter o circuito simples e com a menor quantidade de componentes possíveis. Através do valor das resistências R3 e R4, é variado o valor da tensão em conformidade

com o índice de humidade desejado, servindo o mesmo de referência para o comparador (Figura 44).

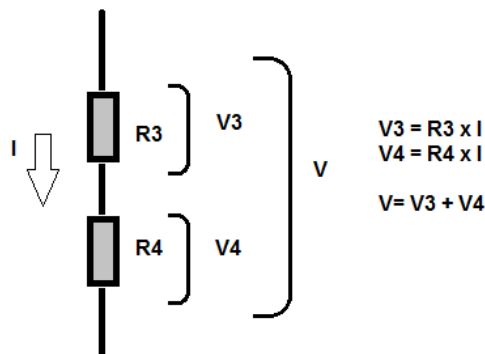


Figura 44 - Divisor de tensão com resistências.

Através da consulta da bibliografia anteriormente apresentada no capítulo 2.4 foi possível observar que para índices de humidade relativa inferiores a 35% não é aplicado qualquer controlo. Deste modo, e de acordo com a literatura apresentada, o valor limite de controlo aplicado será de 35%. Assim, quando o índice de humidade relativa no ar no interior do expositor for inferior a 35% o sistema de anti-embaciamento será desligado de modo a evitar o consumo de energia.

Recorrendo à curva de operação do sensor de humidade, verificou-se qual a tensão pretendida em R_4 e variou-se o valor das resistências em conformidade. Este valor serviu como referência no comparador. Através das fórmulas apresentadas na Figura 44, e verificando o valor da corrente que atravessa as resistências R_3 e R_4 foram determinados os seus valores.

Para 35% de humidade relativa do ar, o valor da tensão obtida é de 1,6 mV.

$$V = RI \quad [20]$$

$$V_4 = R_4 \times I$$

- $I = 44,409 \times 10^{-6} A$
- $V_4 = 1,6 mV$

$$1.6 \times 10^{-3} V = R_4 \times 44,409 \times 10^{-6} A$$

$$R_4 = 36 \Omega$$

$$V = V_3 + V_4$$

$$V_3 = V - V_4$$

$$V_3 = 9V - 1.6 \times 10^{-3}V$$

$$V_3 = 8,9984V$$

$$V_3 = R_3 \times I \leftrightarrow 8,9984V = R_3 \times 44,409 \times 10^{-6}A$$

$$R_3 = 202,625k\Omega \cong 200k\Omega$$

Após a determinação do valor das resistências, foi necessário efetuar uma simulação e recorrer ao osciloscópio XSC1 de modo a verificar os valores da tensão nos pontos em que este se encontra ligado. Deste modo, após algumas simulações, foi notado que caso o sensor não detete humidade no ar, a tensão aplicada ao terminal positivo do comparador nunca baixava de 2,2 mV, o que iria impossibilitar a aplicação de um valor de referência tão baixo para este circuito/sensor. Devido a estas limitações, tornou-se necessário aplicar um valor de referência mais elevado. Assim, repetindo o procedimento anterior para a determinação do valor das resistências e considerando um valor de humidade relativa de referência de 37% (4,108 mV), foi determinado que o valor das resistências R3 e R4 a aplicar seria de 202 kΩ e 92 Ω respetivamente.

Com os valores obtidos, foram selecionadas as resistências com valores mais próximos, 200kΩ e 100Ω, respectivamente. Com a aplicação destas resistências, o valor de referência aplicado passou para 4,5 mV. Este valor permite que o sensor consiga fornecer um valor abaixo do valor de referência, desligando o sistema de anti-embaciamento para humidades relativas abaixo de 37% e permite ainda uma diferença mais que suficiente para cumprir o *input offset voltage* do comparador, que é de 2 mV (Philips, 1995). Assim, quando o valor obtido pelo circuito do sensor for superior ao valor de referência colocado no comparador, este satura positivamente e gera um sinal com a informação correspondente à ordem relativa dos valores de tensão dos sinais. Este valor é encaminhado para o transístor Q2 que permite a passagem de corrente pela bobina do relé.

A passagem da corrente pelos terminais da bobina vai criar um campo eletromagnético na mesma e fechar o “interruptor” do sistema de anti-embaciamento, permitindo que este entre em atividade. O diódo D1 foi colocado na posição invertida e em paralelo com o relé por um simples motivo, proteger o transístor Q2. Quando o relé é desligado, o campo magnético criado no mesmo contrai-se e gera uma tensão mais elevada que pode queimar o transístor. Assim, quando ocorre a indução de tensão mais elevada nos extremos da bobina no momento da interrupção da corrente, o diódo polarizado no sentido direto passa a ter uma baixa resistência absorvendo deste modo a energia, que de outra forma poderia afetar o transístor.

O circuito de anti-embaciamento é alimentado por uma fonte de 220V. R6 representa o fio de cromo-níquel e por esse mesmo motivo é colocado com uma resistência no sistema de anti-embaciamento, para efeitos de simulação.

Dimensionado o circuito de controlo, torna-se agora necessário simular o mesmo no *software*, com o intuito de verificar se este funciona corretamente em função do pretendido.

4.3.2. Simulação em *Multisim*

O estudo numérico efetuado em *Multisim* considerou a variação de humidade relativa do ar no interior do expositor, que por sua vez iria variar o comportamento do circuito de anti-embaciamento. Aquando da variação da humidade relativa do ar, caso esta fosse mais elevada que o nível de referência aplicado no comparador (37% de humidade relativa), o sistema de anti-embaciamento entrava em atividade. Contrariamente, caso o índice da humidade relativa do ar se apresentasse num índice menor que o de referência, o sistema de anti-embaciamento iria desligar, permitindo uma poupança energética.

Foram realizados 4 ensaios, de modo a permitir avaliar o comportamento do circuito. Foi selecionado o valor máximo de humidade relativa do ar determinada na curva de operação do sensor, 75%, e três valores próximos do valor de referencia, 37.25%, 36.75% e 36,50%. Estes últimos valores foram selecionados para verificar se em valores próximos do valor de referência, o comparador mantinha um comportamento correto.

4.3.2.1. Ensaio para 75% de humidade relativa

A Figura 45 exhibe o resultado apresentado no osciloscópio para o presente ensaio. Para determinar o valor de tensão que devia ser introduzido no polo positivo do comparador, foi necessário recorrer ao gráfico de operação. Assim, o valor de tensão a introduzir no comparador, de modo a que seja simulado o ambiente interior com 75% de humidade relativa do ar, é de 3,266V.

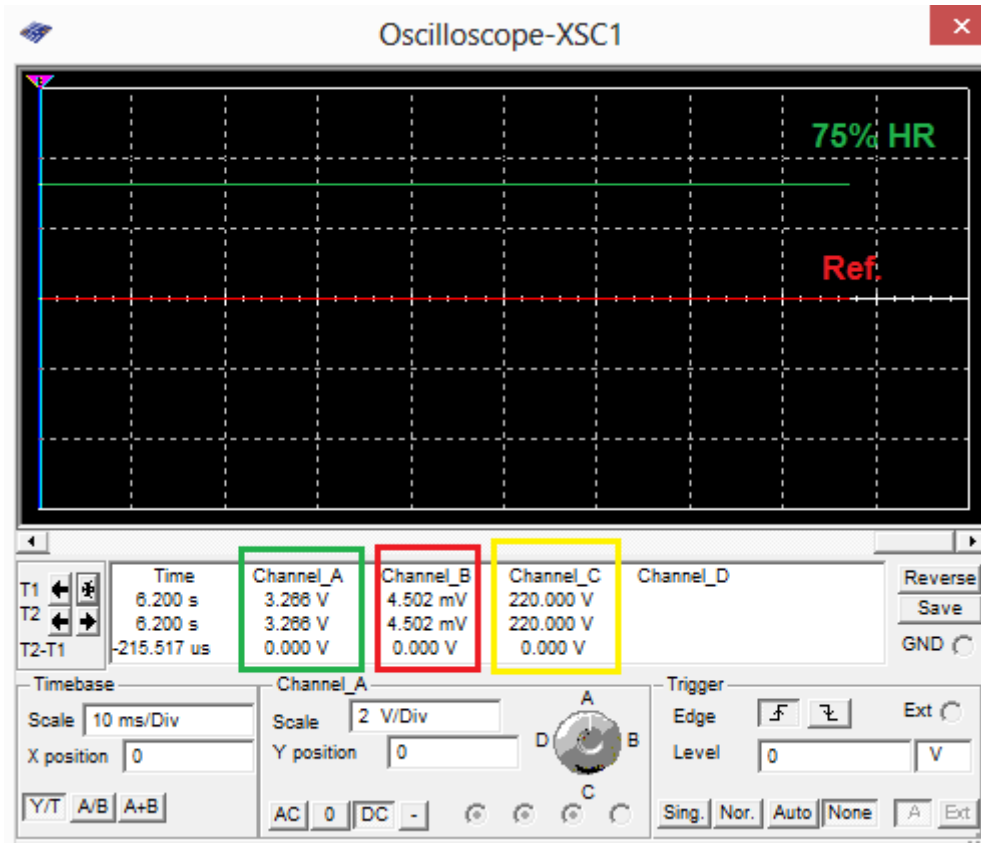


Figura 45 - Leitura do osciloscópio no ensaio a 75% HR.

Quando o ambiente interior apresenta um índice de humidade relativa do ar de 75%, o sistema de anti-embaciamento é ativado. O valor de referência para 37% de humidade relativa, é apresentado no channel B do osciloscópio 1. Dado que o channel A (terminal + do comparador), apresenta um valor mais elevado que o valor de referência, o sistema de anti embaciamento (channel C) é ativado e portanto apresenta um valor de 220V.

4.3.2.2. Ensaio para 37.25% de humidade relativa

A semelhança do ensaio anterior, também nesta simulação foi necessário recorrer ao gráfico de operação. Dado que o índice de humidade relativa do ar selecionado se encontra perto do limite obtido na curva de operação, este apresenta um valor bastante pequeno. Visualizando novamente a curva de operação, foi determinado que o valor a colocar no terminal positivo do comparador, com a finalidade que o ambiente interior simulado apresente um índice de 37,25% de humidade, é de 4,6mV. A Figura 46 apresenta o resultado obtido no osciloscópio para o ensaio a 37,25% de humidade relativa do ar.

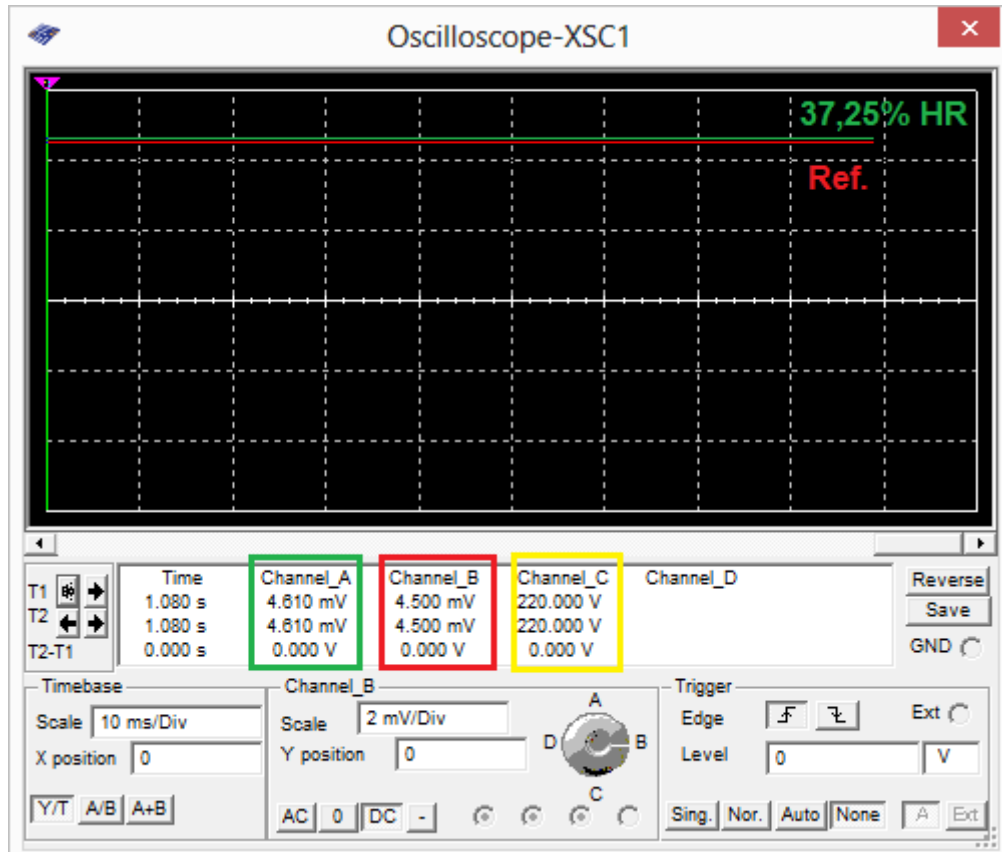


Figura 46 - Leitura do osciloscópio no ensaio a 37,25% HR.

Apesar de se encontrar muito próximo do valor de referência, o comparador apresenta um comportamento correto e continua monitorizar corretamente o sinal de saída. Deste modo, como o índice de humidade se encontra acima de 37%, o sistema de anti-embaciamento encontra-se ativado.

4.3.2.3. Ensaio para 36.75% de humidade relativa

Visualizando a curva de operação do sensor de humidade construído, foi deduzido que para simular uma humidade relativa do ar de 36.75%, é necessário aplicar ao terminal positivo do comparador, uma tensão de 4,3mV. A Figura 47 exhibe o resultado apresentado no osciloscópio para o presente ensaio.

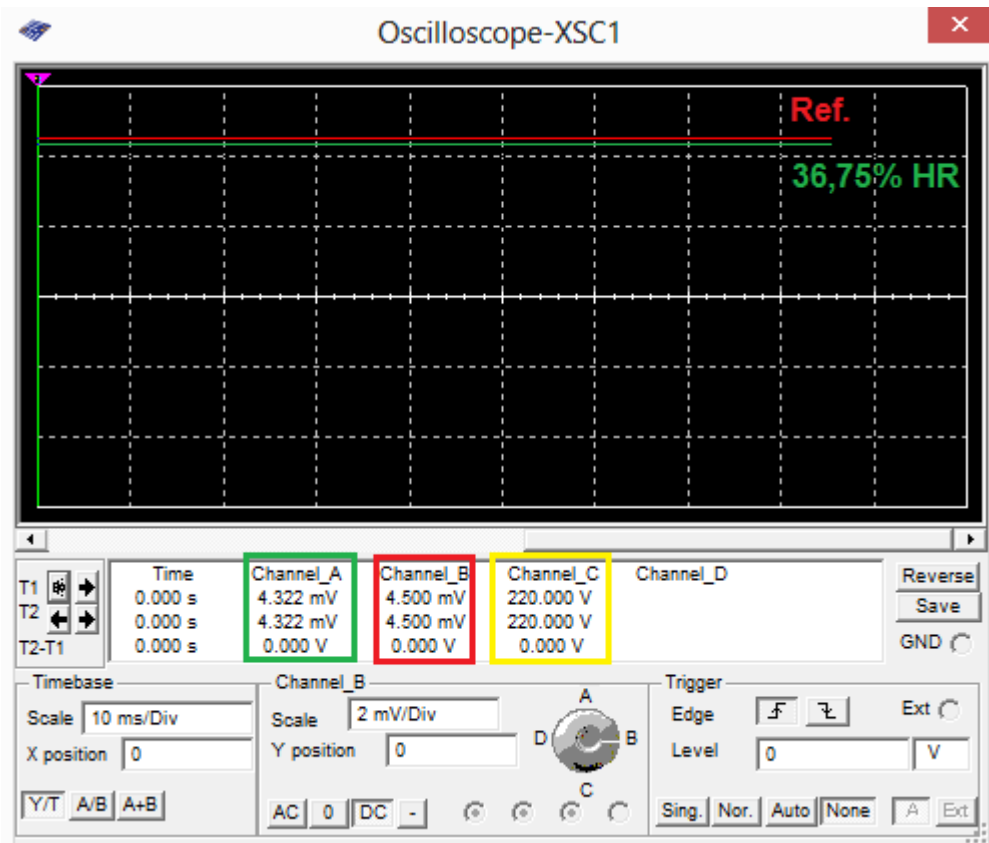


Figura 47 - Leitura do osciloscópio no ensaio a 36,75% HR.

Observando a Figura 47 é notório que apesar de o sinal de entrada do comparador se encontrar abaixo do nível de referência, este não faz com que o sistema de anti-embaciamento seja imediatamente desligado. Devido ao *Input offset voltage* do comparador, é necessário que a diferença entre o sinal mensurado pelo sensor de humidade do ar e o valor de referência seja mais elevado.

4.3.2.4. Ensaio para 36.50% de humidade relativa

Com o intuito de verificar a mudança de estado do sistema de anti-embaciamento, foi realizada mais uma simulação, mas desta feita para um valor de humidade relativa do ar ligeiramente mais baixo que o ensaio anterior. Este ensaio pretende verificar se para este índice de humidade relativa do ar, o comparador desliga o sistema de anti-embaciamento. Recorrendo novamente à curva de operação do sensor, foi verificado que para uma humidade relativa do ar de 36,50% a tensão mensurada é de 3,962mV. A Figura 48 apresenta o resultado obtido no osciloscópio para o ensaio a 36,50% de humidade relativa do ar.

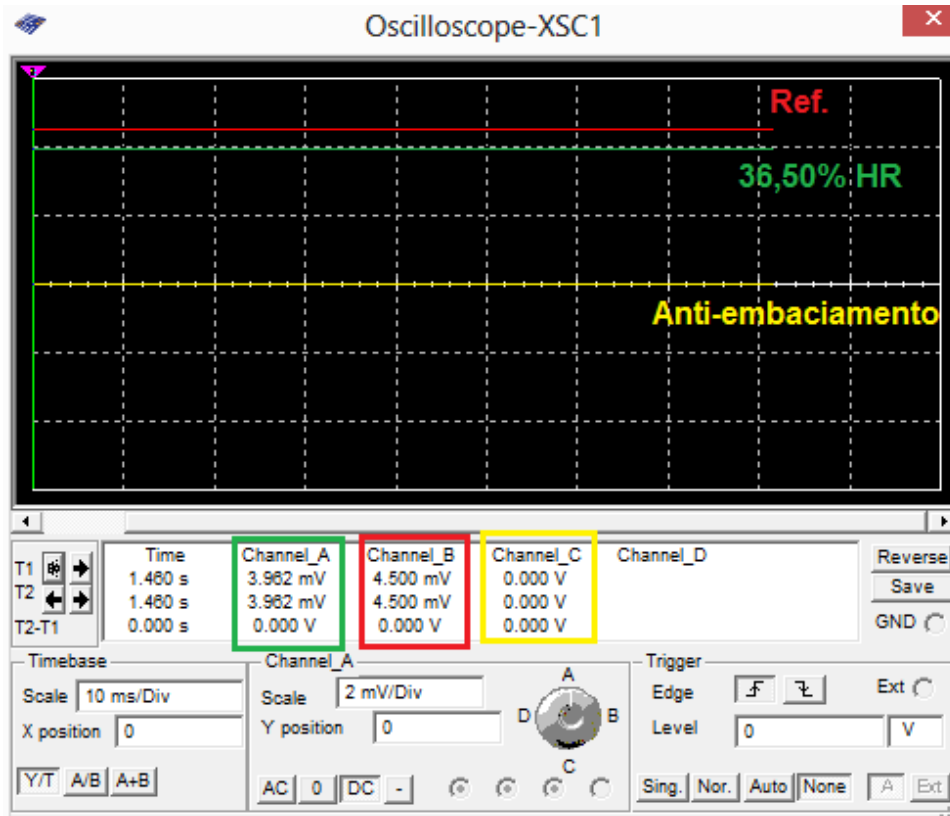


Figura 48 - Leitura do osciloscópio no ensaio a 36,50% HR.

Desta feita e apesar do *input offset voltage* do comparador ser de 2mV, com uma diferença de 0,538mV o comparador não envia sinal suficiente para “ativar” o transistor Q2 e posteriormente o sistema anti-embaciamento não entra em funcionamento. Esta simulação permite observar que a resposta do comparador a este nível de humidade relativa acaba por apresentar uma boa precisão, visto que o valor mensurado pelo sensor apenas precisa de uma diferença de 0,538mV para comutar a saída do comparador para zero.

4.4. Placa de circuito impresso

Demonstrado o correto funcionamento do circuito desenvolvido, através da simulação do mesmo no software *Multisim*, torna-se agora possível e viável projetar o PCB (*print circuit board*) do circuito de controlo.

O circuito impresso, ou *Print Circuit Board* (do inglês), é um módulo no qual estão interligados os componentes eletrónicos que compõem o circuito em questão. Os circuitos são formados por uma fina camada de material condutor depositado, ou “impresso”, sobre a superfície de uma placa de isolamento, conhecida como substrato. Os componentes

eletrônicos, são colocados sobre a superfície do substrato e soldados de modo a que as interligações entre os mesmos, correspondam ao circuito de ligação (TechnologyStudent, 2014).

Existem três tipos principais de construção da placa de circuito impresso: apenas de uma face, frente e verso e multi-camadas. As placas de uma face, têm os componentes apenas de um lado do substrato. Contudo, quando o número e componentes se torna demasiado elevado para ocupar apenas um lado, pode ser utilizada uma placa de duas faces. O último tipo é a placa de multi-camadas. Esta apresenta um substrato feito de camadas de circuitos impressos, separados por camadas de isolamento. Esta última solução simplifica muito o padrão do circuito, mas torna a placa mais cara, que por exemplo, uma placa de apenas uma face (TechnologyStudent, 2014).

4.4.1. Desenvolvimento do PCB

Recorrendo novamente ao software *Multisim*, foi desenvolvido o PCB do circuito de controlo. No entanto, antes do desenvolvimento do PCB foi necessário considerar alguns pormenores:

- O PCB deve seguir a linha de custos de todo o projeto realizado até então, portanto deve ser o mais barato possível. Deste modo é necessário e oportuno colocar todos os componentes e respetivas ligações numa placa de apenas uma face;
- O PCB deve apresentar o menor tamanho possível, de modo a que seja viável a sua colocação em qualquer posição sem interferir com os demais constituintes do interior de um expositor refrigerado utilizado em lojas de comércio alimentar;
- Devem ser colocados 3 conectores diferentes no PCB de modo a que seja possível conectar a alimentação do circuito, o sensor de humidade e o sistema de anti-embaciamento.

Tendo em conta os 3 tópicos mencionados anteriormente, foi necessário numa primeira fase proceder à alteração do circuito, de modo a que fossem colocados os conectores no mesmo. Assim, e recorrendo a biblioteca de componentes do *Multisim*, foram colocados 3 conectores do tipo HDR1X2. A Figura 49 permite observar o circuito de controlo com os 3 conectores colocados.

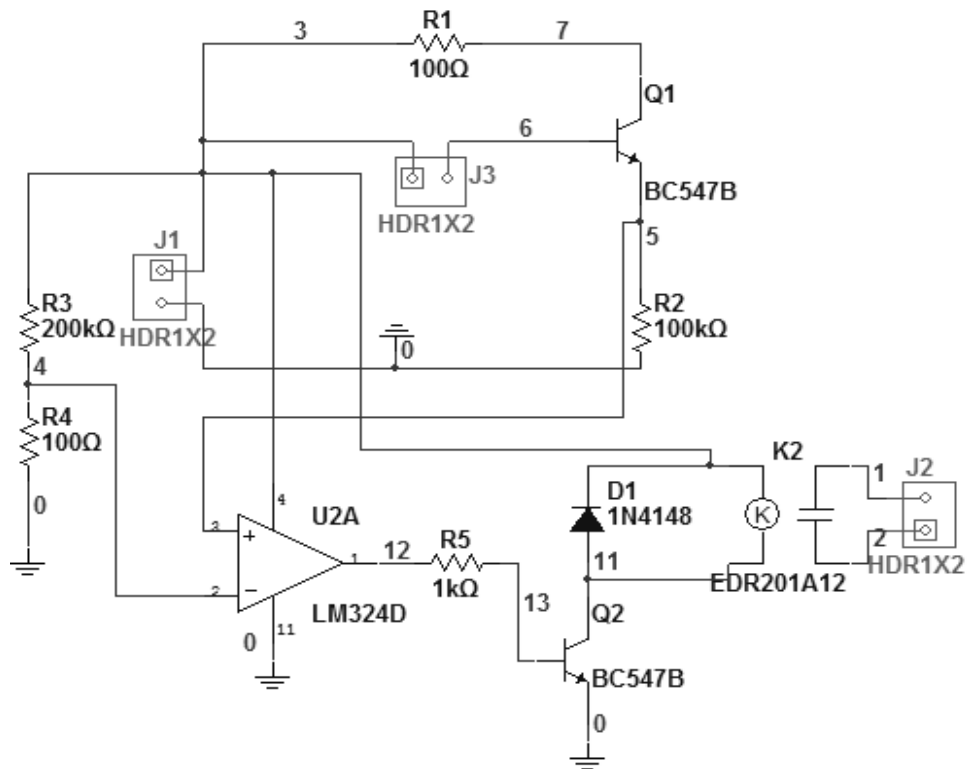


Figura 49 - Circuito de controlo modificado para aplicação em PCB.

A Figura 49 permite visualizar onde foram aplicados os conectores. Deste modo, no conector J1 será aplicada a bateria de 9V anteriormente utilizada, o conector J2 serve para conectar o circuito de anti-embaciamento enquanto que o conector J3 serve para conectar o sensor de humidade do ar desenvolvido.

Dado isto, e com o respetivo circuito desenvolvido, foi efetuado a passagem do circuito para um PCB. Contudo, foi necessário alguma manobra para colocar todos os componentes numa placa de uma face, devido às várias ligações que se cruzam no circuito de controlo. A Figura 50 apresenta a disposição dos componentes no PCB bem como as ligações entre eles efetuadas no software.

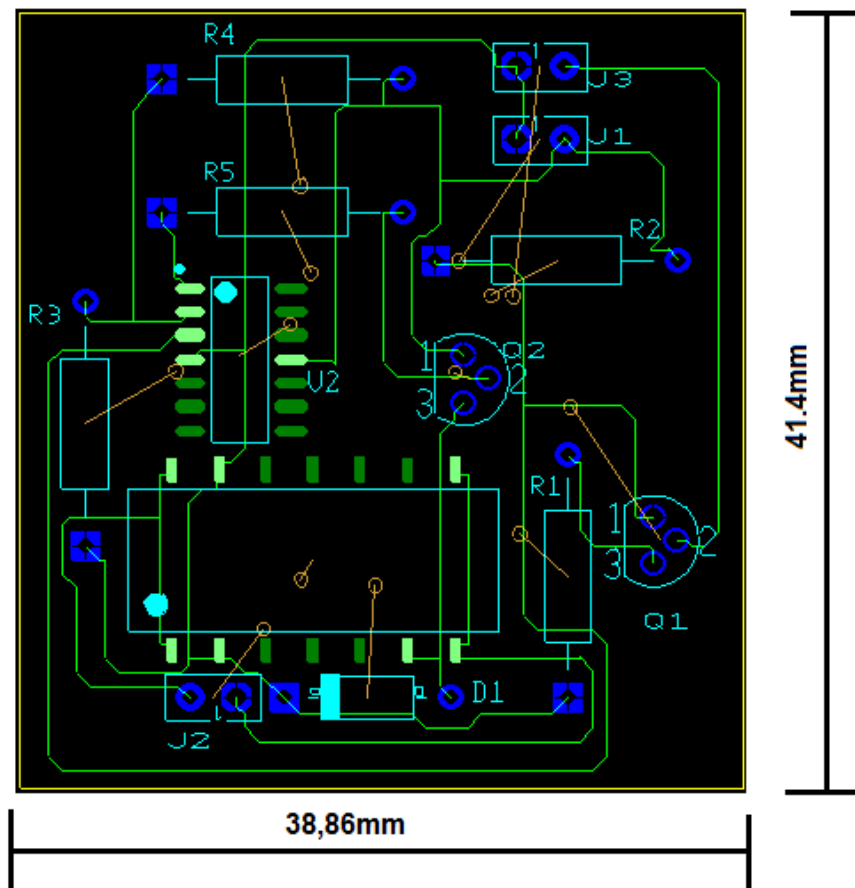


Figura 50 - Layout do PCB com os respectivos componentes do circuito e ligações.

A Figura 50 exibe a disposição dos componentes ao longo da placa desenvolvida, bem como as ligações entre os mesmos. Teve-se o cuidado de colocar os conectores nas extremidades da placa de modo a ser mais fácil efetuar a ligação nos mesmos, bem como não afetar outros componentes durante esse processo de ligação. Através do software é possível verificar as dimensões que a placa desenvolvida apresenta. O PCB em questão apresenta uma largura de 41,4mm e uma altura de 38,86mm (a placa na Figura 50 encontra-se invertida).

Confirmadas todas as ligações numa placa de uma face, recorrendo à opção *Show 3D* do software, é possível visualizar o PCB desenvolvido em 3D, permitindo ter outra perceção do mesmo. A Figura seguinte exibe essa mesma visualização em 3D.

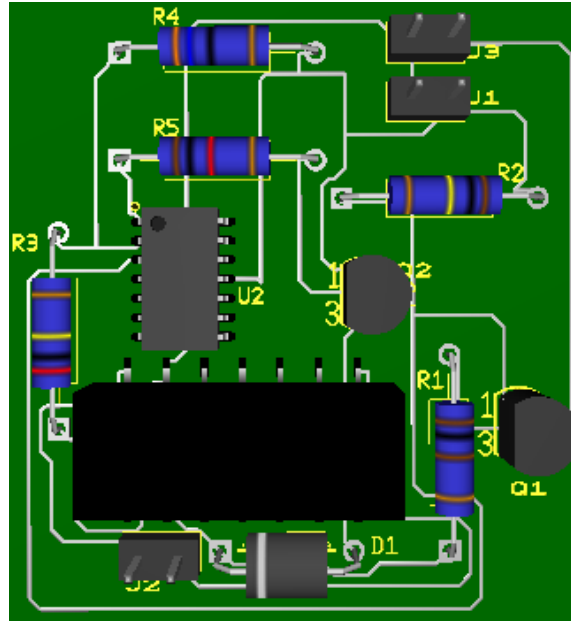


Figura 51 - Visualização em 3D do PCB dimensionado.

A aplicação do circuito em PCB é mais vantajosa em termos de ligações e tamanho. Deste modo, os componentes ficam todos compilados numa simples placa, com as ligações todas definidas de forma correta, restando apenas a ligação entre fonte de alimentação, sensor e sistema de anti-embaciamento. Os mais recentes avanços tecnológicos neste campo permitem até a impressão dos componentes eletrônicos em películas PET, papel resinado ou até papel fotográfico. Isto permite reduzir mais ainda o peso das placas e torna-as menos visíveis aos olhos dos consumidores que utilizam os expositores em lojas de comércio alimentar, destacando-as como uma boa solução a aplicar no interior dos equipamentos (TechnologyStudent, 2014).

4.5. Nota conclusiva

No capítulo que agora termina fez-se a apresentação dos constituintes do protótipo experimental desenvolvido. Foi abordado o desenvolvimento e construção do expositor e apresentado o circuito de controlo desenvolvido. Numa fase posterior, foi efetuada a simulação em *Multisim* do circuito de controlo, com o intuito de verificar o seu comportamento em função do objetivo para o qual foi dimensionado.

Conforme o previsto, após se confirmar o correto funcionamento do circuito através de simulação, foi ainda dimensionado o PCB do respetivo circuito de controlo, tendo em conta os diversos fatores apresentados ao longo da temática.

5. Estudo experimental

5.1. Introdução

O presente capítulo é dedicado à apresentação e discussão do estudo experimental realizado. O capítulo inicia-se com a caracterização da instalação experimental utilizada no âmbito do presente trabalho. O capítulo prossegue com a apresentação do ensaio e sua explicação. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados obtidos ao longo do ensaio experimental.

Pretendeu-se com este estudo experimental, verificar se o circuito desenvolvido até então funciona corretamente na prática através da sua conjugação com o sensor de humidade do ar e protótipo do expositor desenvolvidos.

5.2. Unidade experimental

No presente subcapítulo, será apresentada a unidade experimental utilizada no presente trabalho. Deste modo, são apresentados os equipamentos utilizados durante o procedimento experimental, nomeadamente, os equipamentos que não foram utilizados na calibração do sensor. Será também abordado todo o processo de montagem da bancada de ensaios final, que envolve a conjugação do modelo do expositor, do sensor de humidade do ar bem como do circuito de controlo.

5.2.1. Caracterização da unidade

Para a realização do estudo experimental foi necessária a utilização de vários equipamentos, sendo os mais importantes, a bancada de ensaios composta pelo ar condicionado e demais componentes, o modelo do expositor, o sensor de humidade do ar e o circuito de controlo. À semelhança do estudo realizado para o sensor de humidade do ar, também aqui será necessário variar o índice de humidade do ar recorrendo ao ar condicionado.

No entanto, de modo a garantir a realização do ensaio foi necessário proceder a algumas alterações no âmbito do circuito de controlo:

- O relé aplicado ao circuito de controlo não se encontrava disponível, sendo então necessário recorrer ao único relé funcional e disponível do género, um relé da marca Rapa, modelo 08E-24-002-7. Como este relé necessita de uma alimentação de 24V, foi necessário adicionar à unidade experimental uma fonte de tensão de 24V.

- O comparador LM324D disponível para o ensaio foi do tipo SOIC impedindo a sua direta aplicação na breadboard. Para contornar este problema, foram soldados alguns fios nas respectivas entradas necessárias ao funcionamento do circuito;
- Foi adicionado um LED e uma resistência de 100Ω (para proteção do LED) ao circuito de anti-embaciamento de modo a permitir uma fácil visualização aquando da ativação do sistema;
- Dado que o ensaio experimental será apenas para confirmar se o circuito funciona, não foi colocado nenhum fio de cromo-níquel como sistema de anti embaciamento mas sim um fio de cobre;
- Partindo do tópico anterior, como não será efetuado o teste de desembaciamento, o circuito de anti-embaciamento não será alimentado com 220V e sim com 9V, apenas para verificar o comportamento do LED.

Apesar do ensaio apenas se realizar com o intuito de verificar o funcionamento do circuito para vários cenários com diferentes índices de humidade relativa do ar, não permitindo testar o desembaciamento em ambiente adequado, nem a abertura de porta, este foi na mesma conjuntamente aplicado ao expositor. Deste modo, apesar de todas as restrições ao ensaio, torna-se de certo modo mais real e a aplicação do expositor ao ar condicionado permite desde já, deixar a bancada de ensaios pronta para estudos futuros.

Para a realização do ensaio experimental foram utilizados os materiais enumerados na Tabela 9.

Tabela 9 - Material utilizado para a realização do estudo experimental.

Material	Quantidade	Modelo
Expositor	1	-
Circuito de controlo	1	-
Circuito do sensor	1	-
Ar condicionado	1	P.A. Hilton Ar condicionado Unit A573
Sensor de humidade e temperatura	1	Rotronic Hygrolog NT3 com central de ligação DS-U2
Fonte de tensão	1	24 V
Multímetro	1	DT-830B digital multimeter
Fita adesiva	1	-
Led	1	SSL-LX5093HD-5V
Resistência	1	100Ω
Bateria	2	9V

O expositor foi desenvolvido com a finalidade de ser aplicado como uma extensão do ar condicionado P.A. Hilton. Deste modo, foi decidido que esta seria a primeira etapa da montagem da unidade experimental. Antes da conjugação de ambos, foi necessário aplicar

o fio de cobre em torno da superfície vidrada. Após esta conjugação e terminado todo o isolamento entre a superfície vidrada e acrílico, o expositor foi encaixado no sistema de ar condicionado. As Figuras 52 e 53 exibem fotografias do resultado obtido.

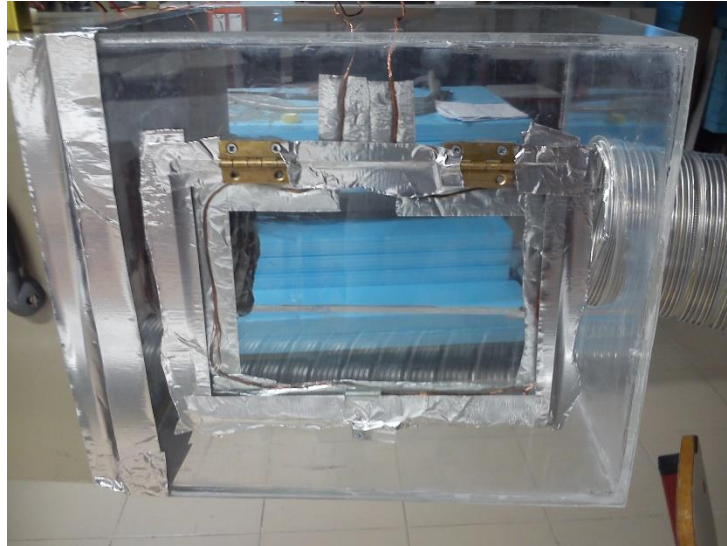


Figura 52 - Aplicação do fio de cobre em torno da superfície vidrada e aplicação do isolamento entre vidro e acrílico.



Figura 53 - Fotografias do expositor acoplado ao AC P.A.Hilton.

Terminada a aplicação do expositor no ar condicionado, foi montado o circuito de controlo com as devidas alterações necessárias para o ensaio experimental. A Figura 54 exhibe fotografias do esquema de montagem do circuito final.

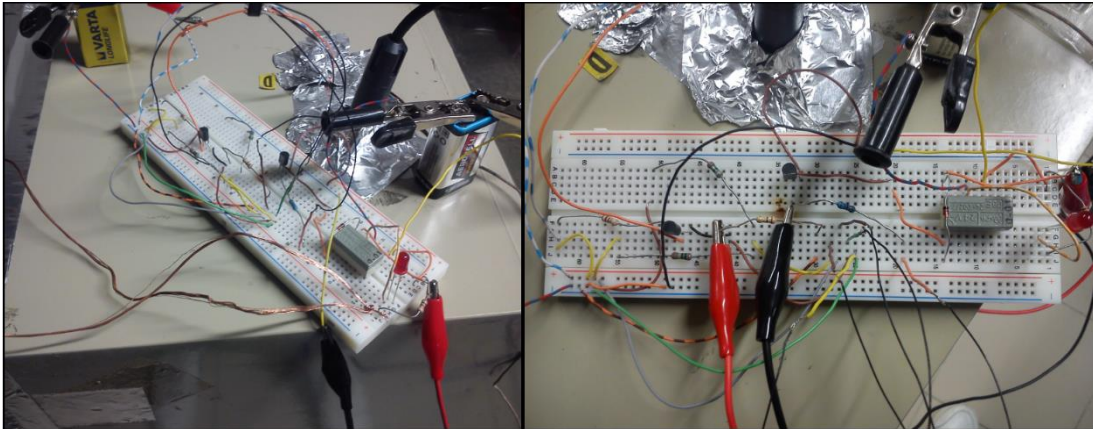


Figura 54 - Esquema de montagem do circuito de controlo.

Observando as figuras anteriores, é notório que o circuito não foi montado na breadboard da forma mais correta e organizada. No entanto, devido aos factos do comparador ter a necessidade de soldar fios nas sua extremidade, e do relé necessitar de uma alimentação extra, a montagem do circuito tornou-se mais complexa e limitou uma boa organização do circuito. Contudo, todos os componentes eletrónicos do circuito foram aplicados numa breadboard.

Após a conclusão da montagem de toda a unidade experimental (Figura 55), foi então realizado o ensaio experimental.

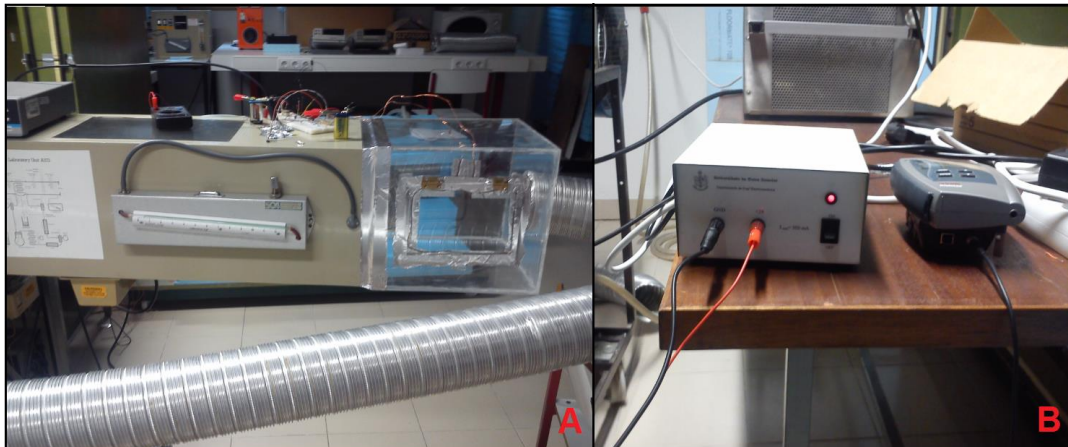


Figura 55 - Montagem experimental. A- AC acoplado ao expositor e circuito de controlo. B- Fonte de tensão de 24V e Sensor de temperatura/humidade de referência.

5.3. Ensaio experimental

Como referido anteriormente, o presente ensaio tem como objetivo estudar e verificar o comportamento do circuito de controlo do sistema de anti-embaciamento variando a humidade relativa do ar interior, a que o sensor de humidade está sujeito.

À semelhança do ensaio realizado para a calibração do sensor de humidade do ar, também aqui foi controlada a humidade relativa do ar interior recorrendo ao ar condicionado P.A. Hilton e ao equipamento de controlo de temperatura. Contudo, ao contrário do ensaio para a calibração do sensor, no presente ensaio não foi necessário deixar o ambiente sofrer elevadas estabilizações, pois apenas era necessário observar se o LED era ativado ou não.

Apesar da devida monitorização através do sensor de humidade do ar desenvolvido, foi mantido o sensor de humidade/temperatura de referência de modo a fornecer uma perceção mais adequada, rápida e precisa em torno do valor imediato que o ambiente interior apresentava.

Durante a realização do estudo experimental foram recolhidas várias fotografias do esquema de montagem de modo a exibir o valor de humidade relativa interior do ar condicionado, o valor mensurado pelo multímetro bem como o comportamento do LED.

5.3.1. Procedimento experimental

1. Colocou-se o ar condicionado em funcionamento, bem como os demais componentes da bancada de ensaios;
2. Colocou-se o circuito de controlo em funcionamento, ligando a fonte de tensão e baterias ao respetivos pontos de ligação;
3. Através da interação com o equipamento de controlo de temperatura e da interação com a interface do ar condicionado, foi colocado o sistema em torno dos 35% de humidade relativa do ar interior (mensurado pelo sensor de referência). Foi retirada uma fotografia ao sistema e anotou-se os respetivos valores apresentados pelos equipamentos de medição;
4. Aumentou-se gradualmente o índice de humidade relativa do ar no interior do ar condicionado até atingir cerca de 80%. Ao longo deste procedimento foram retiradas fotografias do esquema de montagem e anotou-se os respetivos valores apresentados pelos equipamentos de medição;

5.4. Análise e discussão de resultados

Pretende-se com a apresentação dos resultados, dar a conhecer o comportamento do circuito de controlo do sistema de anti-embaciamento ao longo do ensaio experimental efetuado.

Ao longo da variação do índice de humidade do ar durante o ensaio experimental, foram recolhidas várias fotografias que ajudam a perceber o comportamento do circuito. Nas Figuras 56, 57 e 58, podem observar-se os valores mensurados pelos dois sensores de humidade e o comportamento do LED em função do valor mensurado pelo sensor de humidade desenvolvido. A Figura 56 exhibe uma fotografia do ensaio realizado para 35% de humidade relativa do ar interior.

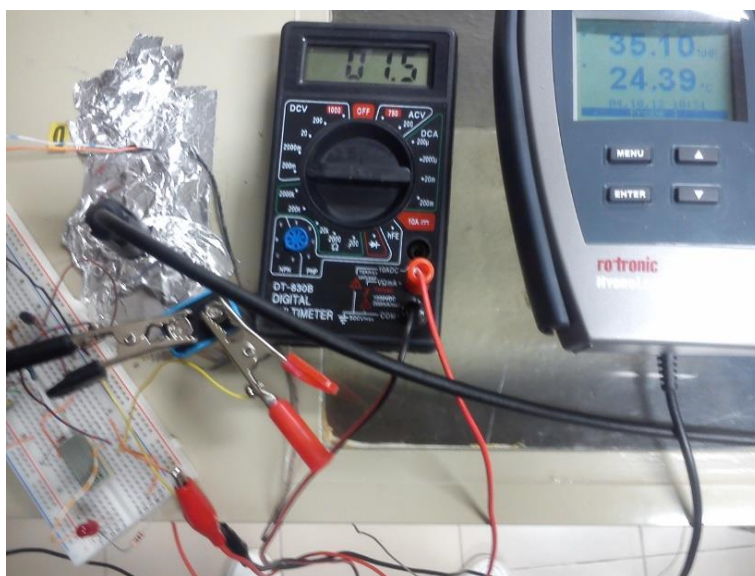


Figura 56 - Fotografia do circuito de controlo e respetivos valores mensurados pelos sensores de humidade para o ensaio a 35% de humidade relativa.

A Figura 57 exhibe uma fotografia do ensaio realizado para 39% de humidade relativa do ar interior.



Figura 57 - Fotografia do circuito de controlo e respetivos valores mensurados pelos sensores de humidade para o ensaio a 39% de humidade relativa.

Por fim, a Figura 58 apresenta a fotografia retirada aos equipamentos de medição e circuito de controlo para o ensaio de 79% de humidade relativa do ar interior.



Figura 58 - Fotografia do circuito de controlo e respetivos valores mensurados pelos sensores de humidade para o ensaio a 79% de humidade relativa.

Da análise das Figuras 56, 57 e 58, pode concluir-se que o circuito de controlo funciona e permite de facto realizar uma monitorização correta do circuito de anti-embaciamento.

No ensaio exibido na Figura 56, é notório que com o índice de humidade do ar apresentado (cerca de 35%) o sistema de anti-embaciamento desliga e não se encontra a consumir energia. No entanto, e observando atentamente o valor obtido no multímetro, este encontra-se abaixo do valor de tensão mínima que o sensor apresentava, 2,2mV, na simulação em *Multisim*. Esta situação pode ocorrer devido ao imprevisto imposto pela aplicação de outros componentes no circuito, que não se encontram na simulação. Contudo, acaba por ser uma situação favorável, pois aumenta o campo de monitorização do sensor de humidade do ar para valores mais baixos.

Nos restantes ensaios apresentados, os equipamentos de monitorização detectaram uma humidade do ar mais elevada que o valor de referência. Desta feita, o sensor de humidade do ar desenvolvido monitorizou os valores em questão e o circuito de anti-embaciamento foi ativado (como é possível observar pelo LED), procedendo de forma correta e de acordo com o princípio de funcionamento projetado.

6. Conclusões

6.1. Considerações gerais

O trabalho desenvolvido consistiu no desenvolvimento de um sensor de humidade do ar de baixo custo, posteriormente complementado com um circuito de controlo, com o intuito de controlar o sistema de anti-embaciamento de expositores refrigerados/congelamento. O estudo global em torno do presente trabalho conclui que o circuito e sensor de humidade do ar desenvolvidos permitem efetuar uma correta monitorização do sistema de anti-embaciamento.

O parâmetro controlado pelo sensor de humidade (humidade relativa do ar interior do expositor), permite que através da variação do seu índice sejam aplicados diferentes comportamentos ao sistema de anti-embaciamento.

A aplicação do sensor de humidade do ar e respetivo circuito de controlo num expositor refrigerado/congelamento de uma loja alimentar, permitirá que a mesma obtenha uma poupança energética do sistema de anti-embaciamento, devido ao facto de este não apresentar um consumo energético contínuo.

6.2. Conclusões específicas

O estudo efetuado mostrou que é possível controlar o sistema de anti-embaciamento com um circuito de controlo e sensor de humidade do ar de baixo custo, levando a uma poupança energética do sistema.

O sensor de humidade do ar desenvolvido permite monitorizar uma elevada gama de valores de humidade relativa do ar, não obtendo sinal para humidades relativas abaixo dos 25% (aproximadamente). No entanto, este problema não afeta o desempenho para o qual foi projetado, visto que esse valor de humidade relativa do ar não ocorre no interior dos expositores.

O sensor de humidade do ar apresenta algumas variações na sua medição, não fornecendo valores precisos devido a sua inconstante medição. Para gamas mais baixas (> 39% HR), devido ao facto de entre 0 e 10mV mensurados pelo sensor, estarem compreendidos 14 níveis de humidade relativa do ar (25 a 39%HR), as variações apresentadas na medição do sensor nesta gama de valores, podem afetar o desempenho do mesmo. Assim, nesta gama de valores, uma pequena variação pode levar a que o índice de humidade obtido não esteja de acordo com o real, podendo variar em alguns níveis. Contudo, no presente ensaio experimental, esse problema não afetou de todo os ensaios. Para valores mais

elevados de humidade relativa do ar, é necessário que o sistema de anti embaciamento esteja ativo, de modo a manter a superfície vidrada desembaciada, permitindo que os consumidores obtenham uma perfeita visualização do interior do expositor. Deste modo, apesar da rápida variação entre valores mais elevados de humidade, quando monitorizados pelo sensor de humidade do ar desenvolvido, isto não afeta de todo o controlo do comportamento do sistema de anti-embaciamento.

Durante o ensaio experimental da calibração do sensor, foi notado que caso este esteja sujeito a humidades elevadas (< 85% HR) durante algum tempo e o valor de humidade relativa do ar seja posteriormente reduzido repentinamente, o sensor de humidade do ar apresenta uma resposta mais lenta a essa mudança. Esta situação ocorre certamente devido à proximidade das placas de cobre que caso estejam sujeitas a ambientes com humidades elevadas, acumulam gotículas de água entre elas.

O circuito de controlo quando conjugado com o sensor de humidade do ar permite realizar uma correta monitorização do sistema de anti-embaciamento. O circuito, à semelhança do sensor de humidade do ar, é de baixo custo e com a menor quantidade de componentes possíveis. No entanto, o circuito desenvolvido apenas permite monitorizar o sistema de anti-embaciamento na sua forma mais simples, ligar e desligar consoante o valor de humidade relativa do ar interior do expositor se encontre abaixo ou acima do nível de referência. Contudo e apesar da sua simplicidade, o circuito permite que o sistema de anti-embaciamento não esteja permanentemente ligado, resultando numa poupança energética e funcionando como uma medida de eficiência energética.

O expositor desenvolvido permite a aplicação de um sistema de anti-embaciamento na sua superfície vidrada, de modo a que seja possível simular um expositor de uma loja alimentar. Porém, devido a diferentes restrições e constrangimentos, foi impossível ensaiar o sistema num caso real. Apesar do modelo não ser perfeitamente hermético, caso fosse possível atingir um ambiente semelhante aquele a que os expositores refrigerados se encontram sujeitos numa loja de comércio alimentar, teria sido possível testar o fenómeno de desembaciamento. Assim, um dos objetivos previamente pensados, que seria testar o fenómeno da abertura da porta bem como os tempos de desembaciamento, tornou-se impossível de verificar.

Todavia, o sistema desenvolvido é de facto de baixo custo, simples e permite o controlo do funcionamento do sistema de anti-embaciamento. O PCB do circuito pode perfeitamente ser aplicado a um expositor refrigerado/congelamento da forma mais discreta possível devido ao seu reduzido tamanho, permitindo que o expositor apresente no final, uma menor fatia no bolo energético da loja de comércio alimentar em questão.

6.3. Sugestões de trabalhos futuros

Da realização do presente trabalho surgem diversas propostas e sugestões para trabalho futuro, entre os quais salientam-se:

- Efetuar ensaios experimentais num caso real, a fim de avaliar o comportamento do circuito num sistema de anti-embaciamento funcional, bem como verificar tempos de desembaciamento e influência dos tempos da abertura da porta do expositor;
- Otimizar o circuito de controlo para que este possa ser aplicado conjuntamente com qualquer sensor de humidade do ar;
- Aplicar o circuito de controlo a uma película condutora e comparar o resultado com um sistema de anti-embaciamento convencional;
- Desenvolver um modelo em CFD de modo a prever onde ocorre primeiramente o fenómeno de embaciamento na superfície vidrada de um expositor refrigerado/congelamento;
- Estudar e quantificar a poupança económica que a aplicação deste sistema permitiria num caso real e compará-lo com outras tecnologias de controlo existentes no mercado.

Referências bibliográficas

AlloyWire (2014), “*Fio de Resistência de Níquel-Cromo*”, Acedido a 5/09/2014 em: http://www.alloywire.com/portuguese/products_RW80.html.

ASHRAE (2010), “*ASHRAE handbook: refrigeration - Retail food store refrigeration and equipment*”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., pp. 1-11.

Baptista, P., Gaspar, P., Oliveira, J. (2007), “*Higiene e Segurança Alimentar na distribuição de produtos alimentares*”, Forvisão - Consultoria em Formação Integrada, S.A.

Castro, S. (2011), “*Sensores de Umidade: Caracterização e Desenvolvimento de Dispositivo Eletrônico*”, Universidade Federal do Itajubá, Itajubá.

Coonrod, S. (2012), “*Methods and systems for defogging transparent doors in display cases*”, RBC Manufacturing Corporation, Beloit.

D’Agaro, P., Groce, G., Cortella, G. (2006), “*Numerical simulation of glass doors fogging and defogging in refrigerated display cabinets*”, Applied Thermal Engineering 26 - Elsevier Journal, pp. 1927-1934.

Dixell (2010), “*Case study of anti-fog film installation to prevent fogging on cabinet glass door*”, Dixell (Asia) Co.,Ltd.

DTE Energy (2012), “*Case Study: Save-A-Lot Food Stores*”, DTE Energy’s Energy Efficiency Program for Business.

EDUFER (2014), “*Tabela de fio Níquel-Cromo para resistores*”, Acedido a 5/09/2014 em: <http://www.edufer.com.br/tabela-fio-niquel-cromo/>

EIA Administration (2013), “*International energy outlook 2013*”, U.S. Energy Information Administration.

Electrónica (2014), “*Componentes - Diodos*”,; Acedido a 3/09/2014 em: <http://www.electronica-pt.com/diodo>.

Evans, J.A., “*Are doors on fridges the best environmental solution for the retail sector?*”, The Institute of Refrigeration, London Chamber of Commerce and Industry,

London, Feb. 2014.

Faramarzi, R. (1999), "*Efficient display case Refrigeration*", Practical guide - ASHRAE Journal, pp. 46-52.

Faramarzi, R., Coburn, B., Sarhadian, R. (2001), "*Anti-sweat heaters in refrigerated display cases*", ASHRAE Journal, pp. 64-65.

Faramarzi, R., Sarhadian, R., Sweetser, R. (2000), "*Assessment of Indoor Relative Humidity Variations on the Energy Use and Thermal Performance of Supermarkets' Refrigerated Display Cases*", Commercial Buildings: Technologies, Design, and Performance Analysis, pp. 125-136

Food Marketing Institute (2004), "*Facts & Figures: Supermarket facts - industry overview 2004*".

Fricke, B., Becker, B. (2010), "*Energy Use of Doored and Open Vertical Refrigerated Display Cases*", International refrigeration and air conditioning conference at Purdue.

Garcia, J.M., Coelho, L.M.R. (2010), "*Energy efficiency strategies in refrigeration systems of large supermarkets*", International Journal of Energy and Environment 4(3), pp. 63-70.

Gaspar, P., Carrilho, L., Pitarma, R. (2011), "*Experimental analysis of the thermal entrainment factor of air curtains in vertical open display cabinets for different ambient air conditions*", Applied Thermal Engineering 31(5).

Helmenstine, A. (2014), "*Table of Electrical Resistivity and Conductivity - Flow of Electric Current Through Materials*", Acedido a 14/07/2014, em: <http://chemistry.about.com/od/moleculescompounds/a/Table-Of-Electrical-Resistivity-And-Conductivity.htm>

Higa, R., Faramarzi, R. (2008), "*Preliminary CASE report: Analysis of Standards Options for Walk-in refrigerator Storage*", Southern California Edison.

Infrico (2014), "*Enfriadores*", Acedido a 5/09/2014 em: <http://www.infrico.es/es/2014-03-05-16-13-49/enfriadores.html>.

International Organization for Standardization (ISO), "*ISO 23953-2: 2005*".

ISCTE (2014), "*Circuitos e sistema eletrónicos - Apontamentos sobre circuitos com*

amplificadores operacionais”, Instituto Superior de Ciências do Trabalho e da Empresa. Acedido a 3/09/2014 em: <http://cadeiras.iscte.pt/cse/Folhas/AMPOPs/AMPOPs.htm>.

Kaur, K. (1014), “*What is a hygrometer?*”, Acedido a 14/07/2014, em: <http://www.azosensors.com/Article.aspx?ArticleID=14>

Misicka, S., Stephens, T. (2013), “*Mudanças sociais despertam emoções na cozinha*”, Swissinfo.ch. Acedido a: 29/08/2014, em: <http://www.swissinfo.ch/por/mudan%C3%A7as-sociais-despertam-emo%C3%A7%C3%B5es-na-cozinha/35229090>

Motorola (1996), “*Amplifier transistors - NPN Silicon BC547B*”, Semiconductor technical data.

National Instruments (2010), “*NI Multisim and Utilitiboard*”, National Instruments.

Philips Semiconductors (1995), “*Low power quad op amps - LM124 / 224 / 324 / 324A / SA534 / LM2902*”, Product Specification.

Pinheiro, P. (2001), “*A carta psicométrica*”, Universidade Federal de Minas Gerais.

Pinto, P., Morais, A. (2000), “*Boas práticas para a conservação de Produtos Hortícolas*”, Associação para a Escola Superior de Biotecnologia da Universidade Católica.

Rauss, D., Mitchell, S., Faramarzi, R. (2008), “*Cool retrofit solutions in refrigerated display cases*”, ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, pp. 233-244.

Southern California Edison (2003), “*The results are clear: Glass doors improve energy efficiency and food quality*”.

SPX (2012), “*Positive Temperature Coefficient (PTC2) Heater Manual*”, PTC2-Manual 1.2.

Sunderland, T., Reichert, C., Dickerson, D. (2011), “*Refrigerated merchandiser with glass door heat control*”, Hussmann Corporation, Bridgeton.

Taras, M., Lifson, A., Lord, R. (2010), “*Thermoelectric device for defogging and defrosting applications*”, Carrier Corporation, Syracuse.

TechnologyStudent (2014), “*Printed Circuit Boards*”, V.Ryan 2002-2013, Acedido a 3/09/2014 em: <http://www.technologystudent.com/pcb/pcbdex.htm>.

The Engineering Toolbox (2014), “*Convective Heat Transfer*”, Acedido a 13/08/2014, em: http://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transfer-d_430.html.

Transparency Market Research (2012), “*Commercial refrigeration equipment market: global industry size, market share, trends, analysis and forecast, 2012 - 2018*”.

Veerasamy, S., Rogueiro, J. (2014), “*Method of removing condensation from a refrigerator/freezer door*”, Guardian Industries Corp.

Walker, D., Faramarzi, R., Baxter, V. (2004), “*Investigation of energy-efficient supermarket display cases*”, U.S. Departement of Energy, pp. 5-13.

Wartchow, C., Frölich, H. (2013), “*Projeto e construção de um sensor de umidade relativa do tipo resistivo*”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-Escola de Engenharia, Porto Alegre.

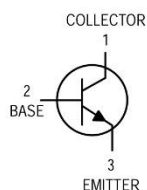
Young, HD., Freedman, R., Ford, L. (2011),” *Physics with Modern Physics*”, Addison-Wesley, 13th Edition.

Anexo A - Datasheets dos componentes eletrônicos

MOTOROLA SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by BC546/D

Amplifier Transistors NPN Silicon



BC546, B
BC547, A, B, C
BC548, A, B, C



CASE 29-04, STYLE 17
TO-92 (TO-226AA)

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	BC 546	BC 547	BC 548	Unit
Collector-Emitter Voltage	V_{CE0}	65	45	30	Vdc
Collector-Base Voltage	V_{CBO}	80	50	30	Vdc
Emitter-Base Voltage	V_{EBO}	6.0			Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	100			mAcd
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	625 5.0			mW mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	P_D	1.5 12			Watt mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-55 to +150			$^\circ\text{C}$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C/W}$

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	-----	------

OFF CHARACTERISTICS

Collector-Emitter Breakdown Voltage ($I_C = 1.0\text{ mA}, I_B = 0$)	BC546 BC547 BC548	$V_{(BR)CEO}$	65 45 30	— — —	— — —	V
Collector-Base Breakdown Voltage ($I_C = 100\ \mu\text{Adc}$)	BC546 BC547 BC548	$V_{(BR)CBO}$	80 50 30	— — —	— — —	V
Emitter-Base Breakdown Voltage ($I_E = 10\ \mu\text{A}, I_C = 0$)	BC546 BC547 BC548	$V_{(BR)EBO}$	6.0 6.0 6.0	— — —	— — —	V
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 70\text{ V}, V_{BE} = 0$) ($V_{CE} = 50\text{ V}, V_{BE} = 0$) ($V_{CE} = 35\text{ V}, V_{BE} = 0$) ($V_{CE} = 30\text{ V}, T_A = 125^\circ\text{C}$)	BC546 BC547 BC548 BC546/547/548	I_{CES}	— — — —	0.2 0.2 0.2 —	15 15 15 4.0	nA μA

BC546, B BC547, A, B, C BC548, A, B, CELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ON CHARACTERISTICS					
DC Current Gain ($I_C = 10\ \mu\text{A}$, $V_{CE} = 5.0\ \text{V}$)	BC547A/548A BC546B/547B/548B BC548C	— — —	90 150 270	— — —	—
($I_C = 2.0\ \text{mA}$, $V_{CE} = 5.0\ \text{V}$)	BC546 BC547 BC548 BC547A/548A BC546B/547B/548B BC547C/BC548C	110 110 110 110 200 420	— — — 180 290 520	450 800 800 220 450 800	—
($I_C = 100\ \text{mA}$, $V_{CE} = 5.0\ \text{V}$)	BC547A/548A BC546B/547B/548B BC548C	— — —	120 180 300	— — —	—
Collector–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10\ \text{mA}$, $I_B = 0.5\ \text{mA}$) ($I_C = 100\ \text{mA}$, $I_B = 5.0\ \text{mA}$) ($I_C = 10\ \text{mA}$, $I_B = \text{See Note 1}$)	$V_{CE(\text{sat})}$	— — —	0.09 0.2 0.3	0.25 0.6 0.6	V
Base–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 10\ \text{mA}$, $I_B = 0.5\ \text{mA}$)	$V_{BE(\text{sat})}$	—	0.7	—	V
Base–Emitter On Voltage ($I_C = 2.0\ \text{mA}$, $V_{CE} = 5.0\ \text{V}$) ($I_C = 10\ \text{mA}$, $V_{CE} = 5.0\ \text{V}$)	$V_{BE(\text{on})}$	0.55 —	— —	0.7 0.77	V
SMALL–SIGNAL CHARACTERISTICS					
Current–Gain — Bandwidth Product ($I_C = 10\ \text{mA}$, $V_{CE} = 5.0\ \text{V}$, $f = 100\ \text{MHz}$)	BC546 BC547 BC548	150 150 150	300 300 300	— — —	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 10\ \text{V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0\ \text{MHz}$)	C_{obo}	—	1.7	4.5	pF
Input Capacitance ($V_{EB} = 0.5\ \text{V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0\ \text{MHz}$)	C_{ibo}	—	10	—	pF
Small–Signal Current Gain ($I_C = 2.0\ \text{mA}$, $V_{CE} = 5.0\ \text{V}$, $f = 1.0\ \text{kHz}$)	BC546 BC547/548 BC547A/548A BC546B/547B/548B BC547C/548C	125 125 125 240 450	— — 220 330 600	500 900 260 500 900	—
Noise Figure ($I_C = 0.2\ \text{mA}$, $V_{CE} = 5.0\ \text{V}$, $R_S = 2\ \text{k}\Omega$, $f = 1.0\ \text{kHz}$, $\Delta f = 200\ \text{Hz}$)	BC546 BC547 BC548	— — —	2.0 2.0 2.0	10 10 10	dB

Note 1: I_B is value for which $I_C = 11\ \text{mA}$ at $V_{CE} = 1.0\ \text{V}$.

Low power quad op amps

**LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902**

DESCRIPTION

The LM124/SA534/LM2902 series consists of four independent, high-gain, internally frequency-compensated operational amplifiers designed specifically to operate from a single power supply over a wide range of voltages.

UNIQUE FEATURES

In the linear mode, the input common-mode voltage range includes ground and the output voltage can also swing to ground, even though operated from only a single power supply voltage.

The unity gain crossover frequency and the input bias current are temperature-compensated.

FEATURES

- Internally frequency-compensated for unity gain
- Large DC voltage gain: 100dB
- Wide bandwidth (unity gain): 1MHz (temperature-compensated)
- Wide power supply range Single supply: $3V_{DC}$ to $30V_{DC}$ or dual supplies: $\pm 1.5V_{DC}$ to $\pm 15V_{DC}$
- Very low supply current drain: essentially independent of supply voltage (1mW/op amp at $+5V_{DC}$)
- Low input biasing current: $45nA_{DC}$ (temperature-compensated)
- Low input offset voltage: $2mV_{DC}$ and offset current: $5nA_{DC}$
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage
- Large output voltage: $0V_{DC}$ to $V_{CC}-1.5V_{DC}$ swing

PIN CONFIGURATION

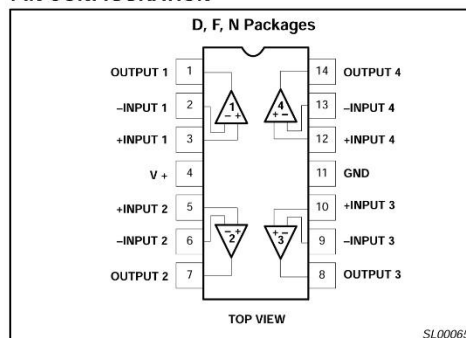


Figure 1. Pin Configuration

ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	LM124N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	LM124F	0581B
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-25°C to +85°C	LM224N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-25°C to +85°C	LM224F	0581B
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-25°C to +85°C	LM224D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0°C to +70°C	LM324N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0°C to +70°C	LM324F	0581B
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0°C to +70°C	LM324D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0°C to +70°C	LM324AN	SOT27-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0°C to +70°C	LM324AD	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +85°C	SA534N	SOT27-1
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-40°C to +85°C	SA534F	0581B
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +85°C	SA534D	SOT108-1
14-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +125°C	LM2902D	SOT108-1
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +125°C	LM2902N	SOT27-1

Low power quad op amps

LM124/224/324/324A/
SA534/LM2902

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SYMBOL	PARAMETER	RATING	UNIT
V_{CC}	Supply voltage	32 or ± 16	V_{DC}
V_{IN}	Differential input voltage	32	V_{DC}
V_{IN}	Input voltage	-0.3 to +32	V_{DC}
P_D	Maximum power dissipation, $T_A=25^\circ\text{C}$ (still-air) ¹		
	N package	1420	mW
	F package	1190	mW
	D package	1040	mW
	Output short-circuit to GND one amplifier ² $V_{CC} < 15V_{DC}$ and $T_A=25^\circ\text{C}$	Continuous	
I_{IN}	Input current ($V_{IN} < -0.3V$) ³	50	mA
T_A	Operating ambient temperature range		
	LM324/A	0 to +70	$^\circ\text{C}$
	LM224	-25 to +85	$^\circ\text{C}$
	SA534	-40 to +85	$^\circ\text{C}$
	LM2902	-40 to +125	$^\circ\text{C}$
	LM124	-55 to +125	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage temperature range	-65 to +150	$^\circ\text{C}$
T_{SOLD}	Lead soldering temperature (10sec max)	300	$^\circ\text{C}$

NOTES:

- Derate above 25°C at the following rates:
F package at $9.5\text{mW}/^\circ\text{C}$
N package at $11.4\text{mW}/^\circ\text{C}$
D package at $8.3\text{mW}/^\circ\text{C}$
- Short-circuits from the output to V_{CC+} can cause excessive heating and eventual destruction. The maximum output current is approximately 40mA, independent of the magnitude of V_{CC} . At values of supply voltage in excess of $+15V_{DC}$ continuous short-circuits can exceed the power dissipation ratings and cause eventual destruction.
- This input current will only exist when the voltage at any of the input leads is driven negative. It is due to the collector-base junction of the input PNP transistors becoming forward biased and thereby acting as input bias clamps. In addition, there is also lateral NPN parasitic transistor action on the IC chip. This action can cause the output voltages of the op amps to go to the $V+$ rail (or to ground for a large overdrive) during the time that the input is driven negative.

REED RELAY
REED RELAY

EDR SERIES

c  US E155181(R)

SIP (PIN OUT:1357)



EDR101A0500

DIP



EDR201A0500

SMD



EDR3D1A1200

SIP (PIN OUT:1267)



EDR101A1250

HIGH INSULATION (DIP)



EDR2H1A0500

HIGH INSULATION (SMD)



EDR3H1A0500

FEATURES

- Miniature, cost-effective switching solution.
- Molded construction for compatibility with automatic board processing.
- Completely washable.
- Dip type construction with the same terminal pitch as ICs or TTLs.
- The high sensitivity allows direct driving by TTL, etc.
- Magnetic shield cover is available.

SPECIFICATIONS● **COIL RATING**

Contact form	Nominal Voltage (VDC)	Max. Operate Voltage (VDC)	Pull-in Voltage (VDC)	Dropout Voltage (VDC)	※Coil Resistance(Ω)	Nominal input power(mW)
1A	5	16	3.75	0.8	500 \pm 10%	50
	12	20	9.00	1.0	1000 \pm 10%	144
	24	32	18.00	2.0	2150 \pm 10%	268
2A	5	11	3.75	0.8	140 \pm 10%	179
	12	20	9.00	1.0	500 \pm 10%	288
	24	32	18.00	2.0	2150 \pm 10%	268
1B	5	6	3.75	0.8	500 \pm 10%	50
	12	14.5	9.00	1.0	1000 \pm 10%	144
	24	29	18.00	2.0	2150 \pm 10%	268
1C	5	11	3.75	0.8	200 \pm 10%	125
	12	20	9.00	1.0	500 \pm 10%	288
	24	32	18.00	2.0	2150 \pm 10%	268

※Special design are available on request.

● **CONTACT RATING**

Contact form	1A	2A	1B	1C	
Switching current	0.5 ADC Max.	0.5 ADC Max.	0.5 ADC Max.	0.2 ADC Max.	
Carry current	1.0 ADC Max.	1.0 ADC Max.	1.0 ADC Max.	0.5 ADC Max.	
Switching power	10 VA Max.	10 VA Max.	10 VA Max.	3 VA Max.	
Electrical life	1x10 ⁸ (Ref 10VDC, 10mA)	1x10 ⁸ (Ref 10VDC, 10mA)	1x10 ⁸ (Ref 10VDC, 10mA)	5x10 ⁷ (Ref 5VDC, 1mA)	
Contact resistance	150m Ω Max.	150m Ω Max.	150m Ω Max.	150m Ω Max.	
Operate time (including bounce time)	1.0ms Max.	1.0ms Max.	1.0ms Max.	1.5ms Max.	
Release time	0.5ms Max.	0.5ms Max.	0.5ms Max.	2.0ms Max.	
Maximum voltage	100 VDC Max.	100 VDC Max.	100 VDC Max.	30 VDC Max.	
Insulation resistance (at 100 VDC)	10 ¹⁰ Ω Min.	10 ¹⁰ Ω Min.	10 ¹⁰ Ω Min.	10 ⁹ Ω Min.	
Dielectric strength	Coil to contact	1400 VDC Min. (General) 4000 VDC Min. (High insulation)	1400 VDC Min.	1400 VDC Min.	1400 VDC Min.
	Across contacts	250 VDC Min.	250 VDC Min.	250 VDC Min.	150 VDC Min.
Temperature range					
Operating temperature	-40 $^{\circ}$ C ~ +85 $^{\circ}$ C	-40 $^{\circ}$ C ~ +85 $^{\circ}$ C	-40 $^{\circ}$ C ~ +85 $^{\circ}$ C	-40 $^{\circ}$ C ~ +85 $^{\circ}$ C	
Storage temperature	-55 $^{\circ}$ C ~ +125 $^{\circ}$ C	-55 $^{\circ}$ C ~ +125 $^{\circ}$ C	-55 $^{\circ}$ C ~ +125 $^{\circ}$ C	-55 $^{\circ}$ C ~ +125 $^{\circ}$ C	
Shock resistance	30G Min.	30G Min.	30G Min.	30G Min.	

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

FEATURES

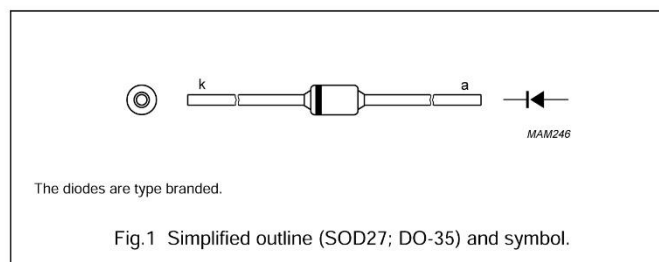
- Hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) package
- High switching speed: max. 4 ns
- General application
- Continuous reverse voltage: max. 75 V
- Repetitive peak reverse voltage: max. 75 V
- Repetitive peak forward current: max. 450 mA.

APPLICATIONS

- High-speed switching.

DESCRIPTION

The 1N4148 and 1N4448 are high-speed switching diodes fabricated in planar technology, and encapsulated in hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) packages.



LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{RRM}	repetitive peak reverse voltage		–	75	V
V_R	continuous reverse voltage		–	75	V
I_F	continuous forward current	see Fig.2; note 1	–	200	mA
I_{FRM}	repetitive peak forward current		–	450	mA
I_{FSM}	non-repetitive peak forward current	Square wave; $T_j = 25\text{ °C}$ prior to surge; see Fig.4 $t = 1\ \mu\text{s}$ $t = 1\ \text{ms}$ $t = 1\ \text{s}$	–	4 1 0.5	A A A
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} = 25\text{ °C}$; note 1	–	500	mW
T_{stg}	storage temperature		–65	+200	°C
T_j	junction temperature		–	200	°C

Note

1. Device mounted on an FR4 printed circuit-board; lead length 10 mm.

Philips Semiconductors

Product specification

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

ELECTRICAL CHARACTERISTICS $T_j = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_F	forward voltage	see Fig.3			
	1N4148	$I_F = 10\text{ mA}$	–	1	V
	1N4448	$I_F = 5\text{ mA}$ $I_F = 100\text{ mA}$	0.62 –	0.72 1	V V
I_R	reverse current	$V_R = 20\text{ V}$; see Fig.5		25	nA
		$V_R = 20\text{ V}$; $T_j = 150\text{ °C}$; see Fig.5	–	50	μA
I_R	reverse current; 1N4448	$V_R = 20\text{ V}$; $T_j = 100\text{ °C}$; see Fig.5	–	3	μA
C_d	diode capacitance	$f = 1\text{ MHz}$; $V_R = 0$; see Fig.6		4	pF
t_{rr}	reverse recovery time	when switched from $I_F = 10\text{ mA}$ to $I_R = 60\text{ mA}$; $R_L = 100\ \Omega$; measured at $I_R = 1\text{ mA}$; see Fig.7		4	ns
V_{fr}	forward recovery voltage	when switched from $I_F = 50\text{ mA}$; $t_r = 20\text{ ns}$; see Fig.8	–	2.5	V

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j-tp}$	thermal resistance from junction to tie-point	lead length 10 mm	240	K/W
$R_{th\ j-a}$	thermal resistance from junction to ambient	lead length 10 mm; note 1	350	K/W

Note

1. Device mounted on a printed circuit-board without metallization pad.

Anexo B - Desenho técnico expositor

